

**INSTITUTO TECNOLOGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS MONTERREY**

**DIVISION DE GRADUADOS EN INGENIERIA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA**



**EVALUACION DE ARCILLAS ACTIVADAS, ZEOLITA NATURAL Y
ZEOLITA MODIFICADA PARA LA REMOCION DE COLOR EN UN
EFLUENTE PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA TEXTIL**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO ACADEMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN INGENIERIA AMBIENTAL**

MARCO ANTONIO MARTINEZ CINCO

MONTERREY, N. L.

JUNIO 1999

**INSTITUTO TECNOLOGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS MONTERREY**

**DIVISION DE GRADUADOS EN INGENIERIA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA**



**EVALUACION DE ARCILLAS ACTIVADAS, ZEOLITA NATURAL Y
ZEOLITA MODIFICADA PARA LA REMOCION DE COLOR EN UN
EFLUENTE PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA TEXTIL**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO ACADEMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN INGENIERIA AMBIENTAL**

MARCO ANTONIO MARTINEZ CINCO

MONTERREY, N. L.

JUNIO 1999

Dedicatoria

A Dios

A mis padres, Arturo Martínez Nájera y Adelina Cinco de Martínez

A mis hermanos, Maria Auxiliadora Martínez de Montoya, Jovita Martínez Cinco y
Jesús Arturo Martínez Cinco

A todos mis sobrinos, Critina, Sofia, Alejandrito, Paloma. Andrea.

A todos mis amigos, de los cuales no elaboro una lista escrita pero los tengo
siempre presentes.

Agradecimientos

AI CONACYT, por el apoyo brindado durante mi maestría.

AI ITESM, por la formación que me brindo en mi estancia como estudiante de maestría.

AI PGIT, y su directora la Dra. Ma. Del Socorro Marcos Marcos, por su apoyo incondicional.

A mi asesor, Dr. Enrique Cázares Rivera y mis sinodales, Ing. Ignacio Luján y Dr. Jorge García, por toda su valiosa ayuda a la realización de este trabajo.

A mis maestros, compañeros y amigos, mil gracias

Indice

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivo	3
1.3 Justificación	3
1.4 Alcance	4
1.5 Metodología	4
Capítulo 2: Marco Teórico	5
2.1 Colorantes y su clasificación	5
2.1.1 Colorantes ácidos	7
2.1.2 Colorantes dispersos	7
2.1.3 Grupos de colorantes	8
2.2 Caracterización del agua residual	11
2.3 Arcillas	11
2.3.1 Arcillas activadas	12
2.3.2 Procesos de activación de la arcilla	13
2.3.3 Arcilla como adsorbente	13
2.4 Zeolitas	14
2.4.1 Definición y generalidades	14
2.4.2 Tipos de zeolita y estructura	15
2.4.3 Propiedades y aplicaciones	16
2.5 Zeolitas modificadas por un ion orgánico	17
Capítulo 3: Materiales y metodología	20
3.1 Introducción	20
3.2 Materiales, equipo y reactivos utilizados	20
3.3 Metodología	21
3.4 Parámetros a medir	24
3.5 Pruebas con arcilla activada	25
3.6 Pruebas con zeolita natural	26
3.7 Pruebas con zeolita modificada	27
3.8 Pruebas con muestra artificial	28
Capítulo 4: Resultados y discusión	29
4.1 Pruebas con arcilla bentonítica decolorante	29
4.2 Pruebas con zeolita natural	42
4.3 Pruebas con zeolita modificada con cloruro de cetilpiridinio	54
4.4 Pruebas con muestra preparada artificialmente	
Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones	77
Bibliografía	80

Indice de tablas

Capítulo 2: Marco teórico

Tabla 2.1 clasificación de los colorantes	6
Tabla 2.2 clasificación de los colorantes de acuerdo a su C.I. number	7
Tabla 2.3 relación de productos químicos en un lote de teñido	11
Tabla 2.4 fórmulas representativas y algunas propiedades de las zeolitas más importantes	15

Capítulo 3: Materiales y metodología

Tabla 3.1 metodología para evidenciar el efecto adsorbente de la arcilla activada	26
Tabla 3.2 metodología para evidenciar el efecto adsorbente de la zeolita natural	27
Tabla 3.3 metodología para evidenciar el efecto adsorbente de la zeolita modificada	28

Indice de figuras

Capítulo 2: Marco teórico

Figura 2.1: colorantes del grupo azóico	9
Figura 2.2: reacción de una sal diazonio para la formación de colorantes	9
Figura 2.3: molécula de antraquinona	10
Figura 2.4: estructura de los colorantes nitrados	11
Figura 2.5: estructura de la bentonita (●) silicio y (○) oxígeno	13
Figura 2.6: polihedro simple de silicato y aluminio formado por varios tetrahedros. (●) silicio y (○) oxígeno	16
Figura 2.7: molécula de cloruro de cetilpiridinio ($C_{12}H_{38}N^+Cl^-$, Peso molecular 304 g/mol)	18
Figura 2.8: segunda fase del fenómeno de modificación.	18

Capítulo 3: Materiales y metodología

Figura 3.1: pruebas para el efluente de la industria del teñido de alfombras.	22
Figura 3.2: pruebas realizadas para la muestra artificial.	23
Figura 3.3: equipo de la prueba de jarras.	24

Capítulo 4: Resultados y discusión

Figura 4.1: variación de color con sulfato de aluminio a pH inicial de 3.6.	31
Figura 4.2: variación de color con sulfato de aluminio a pH inicial 3.6.	31
Figura 4.3: variación de color una combinación de arcilla y sulfato de aluminio a pH inicial de 3.6	32
Figura 4.4: variación de turbidez con arcilla decolorante a pH inicial de 3.6	33
Figura 4.5: variación de turbidez con sulfato de aluminio a pH inicial de 3.6	33
Figura 4.6: variación de turbidez con una combinación de arcilla y sulfato de aluminio a pH inicial de 3.6	34
Figura 4.7: variación de DQO con Arcilla decolorante a pH inicial de 3.6.	34
Figura 4.8: variación de DQO con sulfato de aluminio a pH inicial de 3.6	35
Figura 4.9: variación de DQO con arcilla decolorante y una dosis constante de sulfato de aluminio de 100 ppm a pH inicial de 3.6	35
Figura 4.10: variación de color con arcilla decolorante a pH inicial de 7.6	37
Figura 4.11: variación de color con sulfato de aluminio a pH inicial de 7.6	37
Figura 4.12: variación de color con arcilla decolorante y sulfato de aluminio pH inicial de 7.6	38

Figura 4.13: variación de turbidez arcilla decolorante a pH inicial de 7.6	39
Figura 4.14: variación de color con sulfato de aluminio a pH inicial de 7.6	39
Figura 4.15: variación de turbidez con arcilla decolorante y sulfato de aluminio a pH inicial de 7.6	40
Figura 4.16: variación de DQO con arcilla decolorante a pH inicial de 7.6	40
Figura 4.17: variación de DQO con sulfato de aluminio a pH inicial de 7.6	41
Figura 4.18: variación de DQO con una combinación de arcilla y sulfato de aluminio a pH inicial de 7.6	41
Figura 4.19: variación de color con zeolita natural y sulfato de aluminio a pH inicial de 7.11	43
Figura 4.20: variación de turbidez con zeolita natural y sulfato de aluminio a pH inicial de 7.11	43
Figura 4.21: variación de DQO con zeolita natural y sulfato de aluminio. pH inicial de 7.11	44
Figura 4.22: variación de color con zeolita natural a pH inicial de 7.11	45
Figura 4.23: variación de color con zeolita natural a pH inicial de 7.72	46
Figura 4.24: variación de turbidez con zeolita natural a pH inicial de 7.72	47
Figura 4.25 : variación de DQO con zeolita natural a pH inicial de 7.72	47
Figura 4.26: variación de color con zeolita natural y sulfato de aluminio a pH inicial de 11.55.	48
Figura 4.27: variación de turbidez con zeolita natural y sulfato de aluminio a pH inicial de 11.55.	49
Figura 4.28: variación de DQO con zeolita natural y sulfato de aluminio a pH inicial de 11.55.	49
Figura 4.29: variación de color con zeolita natural y sulfato de aluminio a pH inicial de 2.47.	50
Figura 4.30: variación de turbidez con zeolita natural y sulfato de aluminio a pH inicial de 2.47.	51
Figura 4.31: variación de DQO con zeolita natural y sulfato de aluminio a pH inicial de 2.47.	51
Figura 4.32: variación de color con zeolita natural a pH inicial de 10.35.	52
Figura 4.33: variación de turbidez con zeolita natural a pH inicial de 10.35.	53
Figura 4.34: variación de DQO con zeolita natural a pH inicial de 10.35.	53
Figura 4.35: variación de color con zeolita modificada a pH inicial de 7.58.	55
Figura 4.36: variación turbidez con zeolita modificada a pH inicial 7.58	56
Figura 4.37: variación de DQO con zeolita modificada a pH inicial de 7.58	56
Figura 4.38: variación de turbidez con zeolita modificada. pH inicial de 10.15.	57
Figura 4.39: variación de DQO con zeolita modificada a pH inicial de	

10.15.	58
Figura 4.40: variación de color con zeolita modificada a pH inicial de 3.39	59
Figura 4.41: variación de turbidez con zeolita modificada a pH inicial de 3.39.	59
Figura 4.42: variación de DQO con zeolita modificada a pH inicial de 3.39.	60
Figura 4.43: variación de color con zeolita modificada a pH inicial de 9.17.	60
Figura 4.44: variación de turbidez con zeolita modificada a pH inicial de 9.17.	61
Figura 4.45: variación de DQO con zeolita modificada a pH inicial de 9.17.	61
Figura 4.46: variación de color al variar los valores de pH	63
Figura 4.47: variación de color al variar los valores de pH.	63
Figura 4.48: variación de color al variar los valores de pH	64
Figura 4.49: variación de color con zeolita natural y muestra artificial.	65
Figura 4.50: variación de turbidez con zeolita natural y muestra artificial	65
Figura 4.51: variación de la DQO con zeolita natural y muestra artificial	66
Figura 4.52: variación de color con zeolita modificada y muestra artificial.	67
Figura 4.53: variación de turbidez con zeolita modificada y muestra artificial.	67
Figura 4.54: variación de DQO con zeolita modificada y muestra artificial.	68
Figura 4.55: variación de color con zeolita modificada y muestra artificial.	68
Figura 4.56: variación de turbidez con zeolita modificada y muestra artificial.	69
Figura 4.57: variación de DQO con zeolita modificada y muestra artificial.	69
Figura 4.58: variación de color con una concentración constante de zeolita y muestra artificial con ácido acético	71
Figura 4.59: variación de turbidez con una concentración constante de zeolita y muestra artificial con ácido acético	71
Figura 4.60: variación de DQO con una concentración contante de zeolita y muestra artificial con ácido acético	72
Figura 4.61: Comportamiento del color con una muestra artificial antes y después de la adición de zeolita modificada.	73
Figura 4.62: variación de color con una concentración contante de zeolita y muestra artificial con detergente.	73
Figura 4.63: Comportamiento de la turbidez con una muestra artificial antes y después de la adición de zeolita modificada.	74
Figura 4.64: variación de turbidez con una concentración constante de zeolita y muestra artificial con detergente.	75

Figura 4.65: Comportamiento de la DQO con una muestra artificial antes y después de la adición de zeolita modificada. 75

Figura 4.66: variación de DQO con una concentración constante de zeolita y muestra artificial con detergente. 76

Resumen

El agua es un recurso utilizado en grandes cantidades en la industria textil para los procesos de teñido y lavado. El agua de procesos, después de ser utilizada presenta cierto grado de coloración, además de que contiene carga orgánica, lo que la hace poco útil para su reuso, ocasionando el consumo de grandes cantidades de agua en este tipo de industrias.

El presente trabajo presenta la evaluación de la capacidad adsorbente de dos tipos de materiales: arcilla activadas y zeolita. Estos materiales tienen la capacidad de adsorber cationes, y en el caso específico de la zeolita, se le puede dar un tratamiento con un ion orgánico (por ejemplo, el cloruro de cetilpiridinio) invirtiendo la carga de la zeolita y convirtiéndola en un intercambiador aniónico.

Se realizaron experimentos a diferentes valores de pH para la arcilla, la zeolita natural y la zeolita modificada. Se utilizó agua residual proveniente de una industria textil y una muestra preparada en forma artificial para comparar los resultados entre ambas.

En el caso de la arcilla no se observó capacidad adsorbente a dos diferentes valores de pH (3.6 y 7.6). Se experimentó con zeolita natural y muestra de agua de la planta textil, observándose buenos resultados para valores de pH igual a 2.5 y 11.6, en cambio al utilizar una muestra diferente no se observó remoción de color.

La zeolita modificada también tiene capacidad de adsorber color del agua residual, pero su comportamiento no es constante y varía en función de la muestra de agua residual empleada. Debido a ello se planearon experimentos con una muestra artificial preparada con un colorante disperso de color azul. Con esta muestra se obtuvieron porcentajes de remoción de color con zeolita modificada hasta del 90%, en cambio no se observó remoción de color al utilizar la zeolita natural.

Se hicieron pruebas con muestra artificial y dos tipos de aditivos que se utilizan en el proceso de teñido: ácido acético y detergente. El ácido acético no interfiere en el proceso de adsorción de color en la zeolita modificada y se observa remociones del orden del 80% utilizando 30 g/l de zeolita modificada. El detergente interfiere en el proceso de adsorción de color ocasionando que las muestra permanezca coloreadas después de la adición de zeolita modificada.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Generalidades

Uno de los principales problemas que presentan las aguas residuales provenientes de actividades industriales de giro textil, es la presencia de color en cierto grado, además del contenido de DQO resultante de los aditivos utilizados durante el proceso. El agua residual coloreada con una carga orgánica alta, debe ser tratada de tal manera que cumpla con los límites permitidos por las normas y si se piensa en establecer un sistema de reciclaje de agua, la calidad de ésta debe ser tal que tenga una baja carga orgánica, además de disminuir la intensidad del color que contenga. El presente trabajo se enfoca específicamente a la industria de fabricación y teñido de alfombras y su agua residual.

En el teñido de alfombras, se emplean colorantes de muy diversos tipos. La composición del agua residual depende en gran medida de los compuestos utilizados para teñir y los productos utilizados como aditivos durante el proceso de teñido. Una dispersión de color, bajo las condiciones de tintura, forma un sistema extremadamente complejo. El baño de tintura comprende: color en solución, color en dispersión (en forma de partículas de tamaño variado), agente dispersante, secuestrantes, ácidos, carrier, agente de superficie no iónicos y antiespumantes. Los colorantes utilizados tienen la capacidad de "agotarse" (substantividad), es decir, pierden la capacidad de teñir la fibra. La substantividad es diferente, dependiendo del tipo de colorante utilizado, por ejemplo, los colorantes reactivos

no poseen la elevada velocidad de agotamiento de los colorantes tina reducidos. (Casa, 1969)

De ahí que las características del agua residual son variables y dependen de muchos factores, entre los cuales se puede destacar, el tipo de colorante utilizado durante el teñido y los aditivos empleados. En base a las características del efluente se debe elegir la alternativa de tratamiento para la remoción de color, carga orgánica y otros contaminantes que pudiera contener el agua.

Actualmente existen tecnologías que eliminan el color del agua residual y al respecto existen numerosas investigaciones sobre tecnologías como adsorción, los procesos oxidativos con productos químicos, procesos electroquímicos, procesos biológicos, procesos de coagulación - floculación y sistemas de ósmosis inversa y ultrafiltración, solo por mencionar algunos. La implementación de algunos de los tratamientos mencionados es costosa, lo que da pie a la búsqueda de nuevas tecnologías con alto grado de eficiencia y con costos relativamente bajos. Una de estas tecnologías es el empleo de arcillas activadas y zeolitas para la remoción de color.

Las arcillas activadas se han utilizado para la adsorción de compuestos debido a su capacidad de intercambio catiónico. Zang y Sparks, (1993) estudiaron la cinética de adsorción del fenol y la anilina en arcillas activadas con un ión orgánico; a estas arcillas se les denominan arcillas orgánicas (organo-clay, término en inglés). Las arcillas también pueden activarse con iones inorgánicos, por ejemplo con ácido sulfúrico. Mitall y Venkobachar (1996) mencionan un procedimiento para la sulfonatación con ácido sulfúrico propuesta por Michelson (1975)

Una arcilla de tipo bentonítica activada mediante ácido sulfúrico es la que se probará en la presente investigación para la evaluar la remoción de color y otros parámetros del agua residual.

Se desconoce el mecanismo mediante el cual la arcilla activada realiza la eliminación del color. Existen estudios sobre la capacidad de adsorción de las arcillas y la determinación de los datos para la elaboración de isotermas de adsorción (Ngai y Gomes, 1996). Por otro lado, las arcillas en general tienen la capacidad de intercambiar iones, conocida como capacidad de intercambio catiónico (CIC). Ambos mecanismos se estudiarán entre otros para tratar de explicar de qué forma las arcillas activadas eliminan el color del agua residual (en caso de hacerlo).

Las zeolitas son intercambiadores cationicos naturales debido a una carga negativa que tiene en su estructura ocasionada por una sustitución de iones, generalmente aluminio por silicio. Esta propiedad se aprovecha para adsorber

compuestos o iones y en el presente trabajo se evaluará la adsorción de las moléculas de color presentes de un agua residual de la industria textil.

1.2 Objetivos

- Evaluación de la capacidad de arcillas activadas para la eliminación del color en el agua residual del proceso de teñido de una industria del ramo textil.
- Evaluación de la capacidad de zeolitas naturales para la remoción de color.
- Evaluación de la capacidad de zeolitas modificadas químicamente con Cloruro de Cetilpiridinio para la remoción de color.
- Comprensión de la química del proceso de remoción de color, mediante la variación de pH.

1.3 Justificación

Existen numerosos procesos industriales que hacen uso de grandes cantidades de agua, gran parte de la cual no necesita ser potable ya que solo se utiliza para procesos de enfriamiento o lavado. En este sentido existen dos razones fundamentales que justifican la búsqueda de alternativas para el ahorro de agua: por una parte los altos costos de este recurso en los volúmenes en que se utiliza en el ámbito industrial y por otro lado la calidad resultante de las aguas industriales que por el grado de contaminación de los efluentes no pueden disponerse en los cuerpos receptores de agua sin cumplir la reglamentación en las concentraciones de ciertos parámetros.

México cuenta con una legislación en materia de agua que de alguna manera regula qué contaminantes y en qué cantidad se pueden descargar en ella. El incumplimiento de las normas ocasiona multas dependiendo de las concentraciones y volúmenes de agua residual. Aún así, muchas empresas prefieren incurrir en estos gastos a implementar procesos de tratamiento para aguas residuales. Una de las ventajas de tratar los efluentes industriales, resulta en que el agua proveniente de la planta de tratamiento puede reutilizarse en múltiples procesos que no requieren de agua potable, lo que se traduce en un ahorro de agua y el consecuente ahorro económico.

El beneficio que la industria textil tendrá con este proyecto es una propuesta de solución al problema de la contaminación de las aguas de lavado, dejándola con características tales que puedan volver a ser reutilizadas en los procesos. Se espera que el proceso sea de fácil implementación y de bajo costo comparado con los procesos tradicionales, que actualmente se comercializan aunque el alcance del presente proyecto no contempla la implementación.

1.4 Alcance

El desarrollo de la tesis se limita en la evaluación de arcillas decoloran activados en medio ácido para la remoción de color y DQO, principalmer También se prueba el efecto de zeolitas naturales y modificadas con cloruro cetilpiridinio en la remoción de color y DQO. Se tratará de comprender mecanismos mediante los cuales las zeolitas, naturales o modificadas, remuev el color del agua residual, en caso de que puedan hacerlo.

1.5 Metodología

Los pasos para desarrollar este trabajo son:

- Consulta bibliográfica. Es esta etapa se hace una revisión exhaustiva de investigaciones existentes relacionadas con la remoción de color, en general aquellas que involucran métodos de adsorción y coagulación-floculación, particular. También se hace una revisión de los procesos de teñidos y de tipos de colorantes utilizados para este fin.
- Desarrollo experimental. Consiste en probar el efecto de las arcillas activac en la siguiente forma: a) solamente arcillas activadas, b) solamente sulfato aluminio y c) arcillas activadas y sulfato de aluminio. También se prueba efecto de zeolitas de la siguiente forma: a). naturales, b). modificac químicamente. La experimentación contempla el uso de muestra de la indust textil, así como una muestra elaborada en el laboratorio.
- Análisis de resultados.
- Emisión de conclusiones y recomendaciones.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Colorantes y su clasificación

Los colorantes se han usado desde el siglo XIX, la mayor parte de ellos de origen vegetal, involucraban muchos problemas, tanto en la fuente como en el procesamiento. Las fuentes naturales incluyen tierras de color, materias colorantes vegetales encontradas en flores, semillas, moras, nueces, madera y raíces, y colores obtenidos de origen animal. (Pratt, 1947)

Muchos colorante naturales no tienen afinidad *per se* por las fibras textiles hasta que tales fibras han sido tratadas con aluminio o compuestos de estaño para recibir el colorante; estos compuestos se conocen como "mordientes". En el año de 1856, en el que William Henry Perkin, un químico inglés descubrió los colorantes sintéticos malva marca el inicio de los colorantes sintéticos, que han sustituido en gran medida a los colorantes naturales. (Enciclopedia británica)

Existen dos forma de clasificar a los colorantes, de acuerdo a un convenio internacional de clasificación conocido como Índice de Colores (Colour Index), por uso y por su constitución química.

Por su uso los colorantes se clasifican en colorantes ácidos, colorantes mordaces, colorantes básicos, colorantes dispersos, colorantes naturales y pigmentos, colorantes alimenticios, colorante de piel, colorantes directos, colorantes sulfurados, colorantes de cuba y pigmentos.

Both (1986) realizó un resumen de las características de estos colorantes, que resumen en la tabla 2.1

Tabla 2.1 clasificación de los colorantes

Clase	Propiedades	Cromóforos (principales)	Sustrato adecuado					Otros
			Laca	Algodón	Poliéster	Pollamida	Acrílico	
Ácidos	Soluble en agua, aniónico	Azo (incluye complejos de cromo), Antraquinónicos				X		Piel Seda
Azóicos	Colorante azo formado en fibra e insoluble en agua	Azo		X				
Básicos	Soluble en agua, catiónico	Trifenilmetano, metinas, azos modificados, Antraquinónicos					X	Modif. s, Ac Pape
Directos	Aniónico, soluble en agua	Azo (incluye complejos de cobre), ftalocianidas		X				Pape
Dispersos	Insolubles en agua, no iónicos	Azo, antraquinónicos, nitro			X	X		Aceta
Mordientes	Soluble en agua, aniónico, complejo de cromo formado en la fibra	Azo	X					
Reactivos	Soluble en agua, aniónico, forma enlaces covalentes con el sustrato	Azo (incluye premetalizados), antraquinónicos, ftalocianidas	X	X				
Sulfurados	Solubiliza temporalmente con álcali	Sulfuros		X				
Cubas	Solubiliza temporalmente como éste con hidrosulfito de sodio alcalino	Antraquinónicos Índigos		X				
Pigmentos	Insolubles en agua, no iónicos	Azo Antraquinónicos Ftalocianidas Quinacridonas						Polir Tinta Pintu

Por su constitución química, los colorantes se clasifican en base a su grupo funcional y se le asigna un rango de número a cada grupo funcional, donde encuentran todos los colorantes que lo contienen. A dicho número se le conoce como Número de Índice de Color (C.I Numbers).

Para los fines del presente trabajo, solo se describen las características de colorantes ácidos y los colorantes dispersos, que son los más utilizados en el proceso de teñido de alfombras.

Tabla No. 2.2 clasificación de los colorantes de acuerdo a su C.I. number.

Grupo Funcional	C.I numbers	Grupo Funcional	C.I numbers
Nitroso	10000 - 10299	Indamine	49400 - 49699
Nitro	10300 - 10999	Indophenol	49700 - 49999
Monoazo	11000 - 19999	Azine	50000 - 50999
Diazo	20000 - 29999	Oxazine	51000 - 51999
Triazo	30000 - 34999	Thiazine	52000 - 52999
Polyazo	35000 - 36999	Sulfur	53000 - 54999
Azoic	37000 - 39999	Lactone	55000 - 55999
Stilbene	40000 - 40999	Aminoketone	56000 - 56999
Diphenylmethane	41000 - 41999	Hydroxyketone	57000 - 57999
Triarilmethane	42000 - 44999	Anthraquinone	58000 - 72999
Xanthene	45000 - 45999	Indigoid	73000 - 73999
Acridine	46000 - 46999	Phthalocynine	74000 - 74999
Quinoleina	47000 - 47999	Natural	75000 - 75999
Methine	48000 - 48999	Oxidation Bases	76000 - 76999
Thiazole	49000 - 49399	Inorganic Pigments	77000 - 77999

2.1.1 Colorantes ácidos

Este tipo de colorantes tiene su principal aplicación en el teñido de lana, serigrafía, poliamidas, acrílico y fibras de proteína regenerada. Generalmente las fibras protéicas y de nylon se tiñen en baño ácido y las celulósicas en baño neutro, debido a ello, el valor de pH de los baños varía de 2 a 8.

Muchos de los colorantes ácidos poseen buena solubilidad en agua, lo cual es importante en el teñido de lana y fibras poliamídicas. Químicamente comprenden cuatro grandes grupos: azóico, antraquinónicos, triarilmetánicos y otras clases (xanteno, nitrados, indigides). De acuerdo con sus métodos de aplicación, se dividen en colorantes ácidos de igualación y en colorantes ácidos para el batán, apareciendo tinturas distintas en cada caso, tinturas con colorantes en baño fuertemente ácido, en baño débilmente ácido y en baño neutro. (Casa, 1969)

La molécula de este tipo de colorantes contiene dos grupos funcionales, uno de ellos ácido como el grupo carboxilo y un grupo productor de color (un grupo azo o nitro).

2.1.2 Colorantes Dispersos

Los colorantes dispersos son mayormente insolubles en agua, originalmente introducidos para la tintura del acetato de celulosa y usualmente aplicados en una suspensión acuosa. Actualmente su uso se ha extendido a la coloración de todas las fibras sintéticas hidrofóbicas como las poliamidas, poliacrilonitrilos, poliésteres y acetato de celulosa. Es evidente que al aumentar la cantidad de fibras sintéticas, como consecuencia se ha desarrollado el crecimiento de los colorantes dispersos. (Venkataraman, 1952, v. 3).

Son colorantes que para su aplicación necesitan agentes dispersantes (alcoholes grasos sulfonados, aceites solubles y jabones). Pueden concretarse tres etapas en el proceso de teñido, la primera es la fijación del colorante en el exterior de la fibra, seguida de una disolución del colorante en el interior de la fibra y, por último, la fijación del colorante en la fibra.

Este tipo de colorantes está principalmente dentro de tres grupos químicos, nitroarilamina, azo y antraquinona; y casi todos contienen grupos amino o amino sustituidos, pero no contienen grupos sulfónicos solubles. En general se pueden mencionar los siguientes grupos de colorantes, como colorantes de acetato o dispersos:

- a). Colorantes de antraquinona
- b). Colorantes Azo
- c). Colorantes de Nitrodifenilamina
- d). Colorantes de Metine
- e). Colorantes de quinoftanoleina
- f). Colorantes de naftoquinona

Debido a que estos tipos de colorantes son los más empleados en la industria del teñido de alfombras, se hará una revisión de los principales grupos de colorantes que forman, en forma muy general, a este grupo.

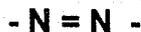
2.1.3 Grupos de colorantes

A. Grupo azóico

El ácido nitroso es uno de los principales agentes utilizados en los primeros experimentos con anilina, y en 1958, el químico alemán Johann Peter Griess obtuvo un compuesto amarillo con propiedades colorantes. Aunque su uso fue principalmente comercial, el descubrimiento de este colorante despertó el interés en la reacción que llegó a ser la más importante en el proceso de la industria de los colorantes sintéticos: la reacción entre el ácido nítrico y una aril amina, produciendo un compuesto intermedio altamente reactivo. La reacción de este compuesto intermedio con fenoles o aril aminas es el paso clave en la síntesis de más del 50% de los colorantes comerciales producidos actualmente. (Enciclopedia británica).

Kekulé propuso en forma acertada que los productos obtenidos de la reacción descrita anteriormente entre los anillos de aril estaban ligados a través de un enlace $-N=N-$ al que llamó grupo azo.

El grupo azo es la unión de dos átomos de nitrógeno mediante un doble enlace.



Este grupo a su vez forma una gran familia de colorantes que, numéricamente, es la más importante de materias colorantes manufacturadas.

La reacción de ácido nitroso con Ar-NH_2 (donde Ar representa un grupo aril) produce Ar-N=N^+ , un ion diazonio, el cual reacciona con anilinas o fenoles para producir compuestos azo como por ejemplo la crisoidina. (ver Figura 1)

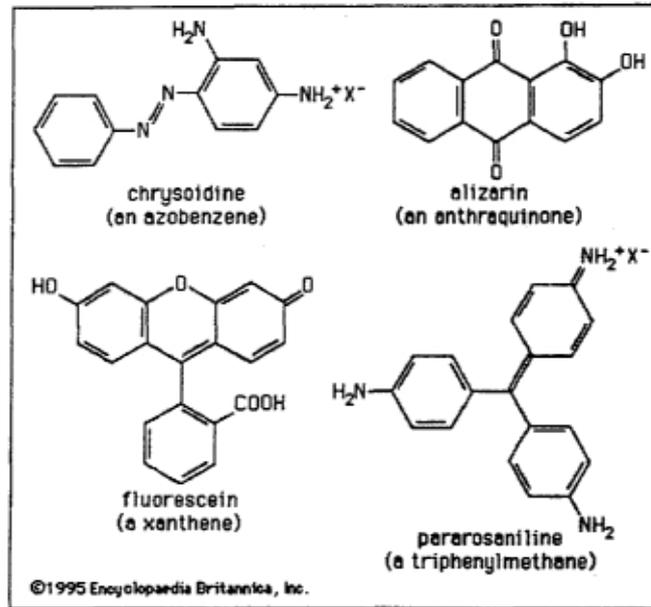


Figura 2.1: colorantes del grupo azóico.

Diversas reacciones pueden dar lugar a la formación de un compuesto azóico, pero tanto en el laboratorio como en la industria, se preparan a partir de dos operaciones: producción de un compuesto de sal de diazonio, por disociación de una amina, y asociación de este compuesto con el fenol o una amina aromática.

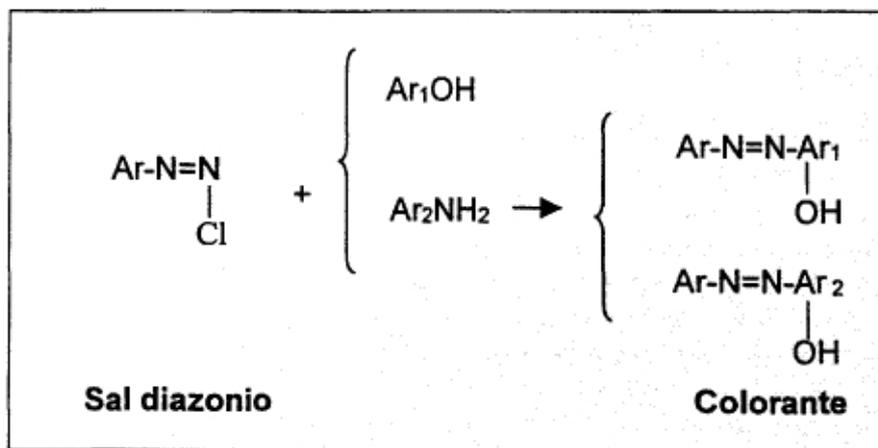


Figura 2.2: reacción de una sal diazonio para la formación de colorantes.

Dentro de estos colorantes existe toda una gama de colores, menos los verdes muy brillantes. Desde el punto de vista químico se subdividen en monoazóicos, diazóicos, poliazóicos; según el número de grupos azo presentes en su molécula, debiendo entonces tenerse en cuenta que cada uno de estos grupos se subdivide a su vez en otros dos, según que los colorantes sean de la familia de las aminas (aminazóicos) o de la de los fenoles (oxiazóicos).

B. Grupo Antraquinónico

Gran familia de colorantes orgánicos artificiales obtenidos como derivados de la antraquinona, ésta se obtiene a su vez por la oxidación del antraceno. El cromóforo de todos estos colorantes es el grupo cetónico C=O de la antraquinona

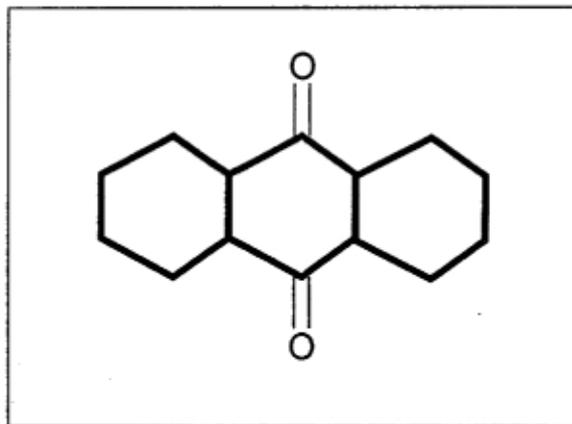


Figura. 2.3 molécula de antraquinona

Este grupo de colorantes se subdivide de acuerdo a los métodos de aplicación hacia diferentes fibras.

Los colorantes ácidos de antraquinona contienen grupos sulfónicos que los hace solubles en agua. Se utiliza para teñir lana y en serigrafía. Los colorantes dispersos de antraquinona carecen de los grupos solubles en agua que tienen los colorantes ácidos, pero son absorbidos por fibras hidrofóbicas tales como el nylon o acetato de rayón. En este tipo de colorantes se adiciona compuestos que rompen la tensión superficial del agua que mantiene suspendido al colorante durante su aplicación. (Enciclopedia Británica)

C. Colorantes Nitrados.

Grupo de colorantes clasificados según su construcción química básica, compuesta por el grupo cromóforo NO₂ en posición *orto* o *para* con relación al auxocromo.

La estructura de este tipo de colorantes se puede expresar en la siguiente figura.

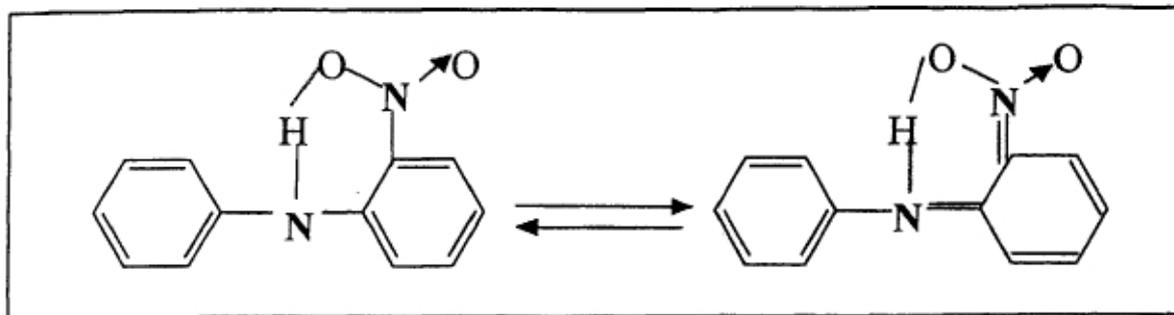


Figura 2.4 estructura de los colorantes nitrados.

Estos colorantes desde el punto de vista del teñido, se dividen en tres grupos, en función de su uso:

- Colorantes ácidos para lana y fibras protéicas.* Son amarillos anaranjados o marrones. Poseen grupos salificables SO_3H que dan solubilidad a la molécula.
- Colorantes dispersos para rayón acetato y fibras manufacturadas.* Son de pequeña magnitud molecular y sin grupos solubilizantes. Cuando tienen grupos carboxílicos son algo solubles en H_2O y tienen poca solidez al lavado
- Colorantes pigmentarios.* Son pigmentos usados para lacas, pinturas, tintas, etc. Son de gran magnitud molecular, por lo que, debido a su tamaño, es mayor que el de los canales intermicelares de las fibras, no tienen utilización textil.

2.2 Caracterización del agua residual

Elizondo (1998) ofrece una descripción detallada del proceso de teñido de alfombras. Para efectos de la realización de este trabajo se presenta una caracterización típica de un efluente proveniente del teñido de alfombras en la tabla 2.3 *

Tabla 2.3 relación de productos químicos en un lote de teñido.

Producto Químico	Cantidad
Colorantes en polvo no solubles en agua	x gramos
Dispersante tipo sal sódica del producto sulfonado de cadena larga	13x
Antiespumante en base aceite	5x gramos
Ácido acético	2x gramos
Carrier (sólo en tonos de color muy intensos)	x gramos
Agua	13,000x gramos

* tomado de Elizondo 1998

2.3 Arcillas

La palabra arcilla proviene del latín "arcilla" y ésta del griego "argos" o "argilos" (que significa blanco), por el color de material usado en la cerámica. El término arcilla, que se considera y define de muchas maneras, es variable y difícil de precisar. En edafología y sedimentología frecuentemente se utiliza como un tamaño ($<2\mu$) que identifica un material heterogéneo, compuesto de minerales propios de la arcilla y otras sustancias incluyendo fragmentos de roca, óxidos hidratados, geles y sustancias orgánicas. (Besoain, 1985)

Los materiales de arcilla tienen una amplia variedad de usos en ingeniería. Los suelos se hacen impermeables al agua, adicionando materiales de arcilla a suelos porosos, la pérdida de agua en canales puede ser reducida adicionando arcilla. Una de las materias primas de la fabricación de cemento es el limo y las arcillas, generalmente impuras. Después de un tratamiento ácido, las arcillas pueden ser utilizadas para suavizar agua; la arcilla remueve calcio y magnesio de la solución, sustituyéndolo por sodio.

2.3.1 Arcillas Activadas

Casi todas las arcillas muestran en forma natural alguna capacidad adsorbente y esta propiedad puede mejorarse en cierto grado mediante un tratamiento ácido. La bentonita es uno de los pocos tipos de arcilla que puede activarse mediante un tratamiento ácido para producir buenos adsorbentes. (Kirk, 1970)

En consecuencia se puede afirmar que la arcilla activada es bentonita tratada con ácidos. La composición aproximada de la bentonita es la siguiente: SiO_2 , 56%; Al_2O_3 , 14%; MgO , 4%; Fe_2O_3 , 2.5 % y pequeñas cantidades de otros óxidos. La bentonita es un término petrográfico para designar a un grupo de yacimientos de minerales arcillosos, principalmente montmorilonita que proviene de la meteorización de cenizas volcánicas. Se le conoce como bentonita debido al nombre del lugar donde fue descubierta, Fort Benton, Montana.

La arcilla bentonita se compone principalmente de Na^+ - montmorilonita. Es un mineral que tiene una estructura de una sola capa que consiste en una hoja de un octaedro de Al^{3+} localizado entre dos hojas de tetrahedros de Si^{4+} . En la hoja de tetrahedros, el Al^{3+} puede sustituir al Si^{4+} . Esta sustitución isomórfica ocasiona una red de carga negativa en la superficie de la arcilla. Comúnmente, cationes inorgánicos (por ejemplo, H^+ , Na^+ , Ca^{2+}) compensan este desbalance de cargas en las superficies internas y externas de los cristales de montmorilonita. (Zhu, Li y otros, 1997)

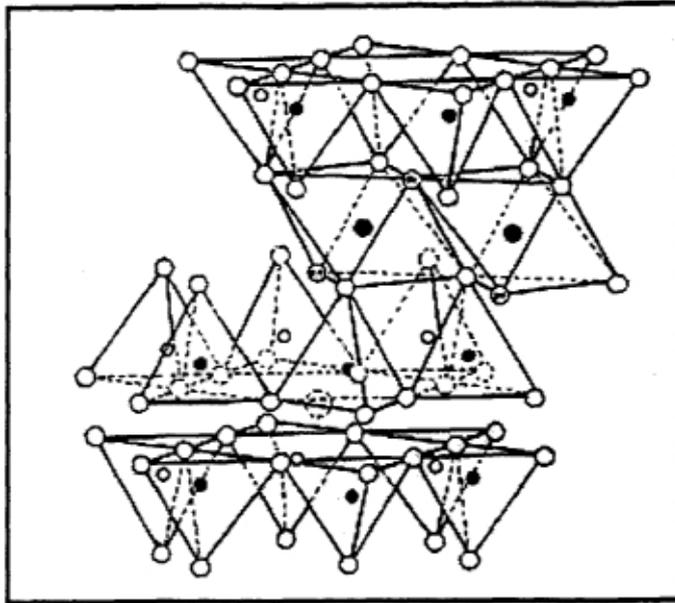


Figura 2.5: estructura de la bentonita (●) silicio y (○) oxígeno.

2.3.2 Proceso de Activación de la arcilla.

Un proceso propuesto por Kirk es el siguiente. La tierra triturada se mezcla con agua para formar una papilla a la que se añade ácido sulfúrico en la proporción aproximada de 35% de peso total de la arcilla. Después se trata la mezcla con vapor vivo a temperatura de 93- 99°C durante 5 a 6 horas. La mayor parte del ácido se consume durante este tiempo y la mezcla tratada se vierte en agua limpia y después se lava en un filtro prensa o en un sistema de espesamiento con el propósito de eliminar las sales formadas y el exceso de ácido.

Otro método propuesto por Michelson 1975 y citado por Mittal y Venkobachar en 1996, consiste en adicionar ácido sulfúrico concentrado en una proporción de 600 ml por cada 100 g de arcilla. La mezcla es tratada en un baño de agua a 90 ± 2 °C durante 12 horas con mezclado intermitente. Después de esto, la arcilla activada se lava con agua destilada para remover cualquier residuo de ácido. Posteriormente se tritura la arcilla hasta lograr el tamaño deseado.

2.3.3 Arcilla como adsorbente

Las arcillas en forma natural, activadas con ácidos o bien con un ión orgánico (organobentonita) han sido analizadas para evaluar su efecto absorbente ante diversos compuestos contenidos en el agua.

Eick, Bar-Tal y colaboradores en 1990 reportaron la investigación de la cinética de absorción de potasio y calcio en monmoniolita utilizando un flujo completamente mezclado. Se estudiaron factores como el tiempo al que se llegaba a un equilibrio

y la dependencia de la concentración de la solución de un modelo cinético contra la independencia de la concentración de la solución. Encontraron que el intercambio de K-Ca en la monmoniorita fue demasiado rápida para ser medida en un flujo completamente mezclado.

Atanassova reportó en 1994 una investigación sobre la adsorción y desorción de Cu a altas concentraciones de equilibrio por muestras de tierra y arcillas. Utilizó diferentes muestras de arcilla y tierra procedente de diferentes regiones y observó, para el caso de un tipo de arcilla, adsorción hasta del 75%.

Jardine, Zelazny y Parker (1985) investigaron los mecanismos de la adsorción de aluminio sobre minerales de arcilla y turba. Para ello se utilizó kaolinita saturada con iones de Ca^{2+} , monmoniorita y turba en columnas. Se utilizaron soluciones de AlCl_3 de concentración conocida. Se observó que las especies poliméricas de aluminio son adsorbidas preferencialmente por la kaolinita a lo largo de todo el experimento, mientras absorbe monómeros de aluminio en periodos cortos de tiempo, dicho comportamiento no se observó en la turba

2.4 Zeolitas

2.4.1 Definición y Generalidades.

Las zeolitas fueron descubiertas en 1756 por el baron Axel Fredrick Cronstedt, mineralogista sueco que las llamó de esta forma por las raíces griegas *zev* y *lytos* que significa "piedras hirviendo" en virtud de la propiedad que tienen de burbujear cuando se les calienta.

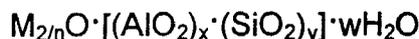
Las zeolitas son aluminosilicatos que incluyen en su composición álcali o cationes de tierras alcalinas, con una razón O: (Al+Si) = 2. Su principal característica es la capacidad de ganar y perder agua en forma reversible además de intercambiar cationes sin alterar su estructura. (Mumpton y Fishman, 1977).

Como se mencionó anteriormente, las moléculas de zeolita pueden incorporar moléculas de agua a su estructura de manera reversible, e incluso puede ser sustituida por otras moléculas polares como amoníaco, alcoholes y mercurio sin que la red sufra modificaciones. El acceso a los poros de la zeolita depende del tipo de iones que tiene sustituidos, existen tipos de zeolita cuyas estructuras permiten una apertura de alrededor de 8 Å por lo que este tipo de zeolitas es utilizada como adsorbentes de moléculas grandes. Existen tipos de zeolita que tienen una apertura libre entre los anillos de 4.3 Å (en el caso de Ca^{++}), 3.8 Å (en el caso del Na^+) y 3.0 (para el caso de K^+). Este tipo de zeolitas tiene una adsorción selectiva, dependiendo del tamaño de molécula que generalmente es pequeña. (Ruthven, 1988)

2.4.2 Tipos de Zeolita y Estructura.

Alrededor de 30 zeolitas se producen naturalmente de las cuales alrededor de 8 zeolitas se explotan en forma comercial, ellas son: analcita, chabazita, clinoptinolita, erionita, ferriorita, laumonita, mordenita y filipsita. Cada especie de zeolita tiene su estructura cristalina única y por lo tanto características físicas y químicas particulares. (Rabo, 1976 y Mumpton et. al., 1977)

Las zeolitas pueden ser representadas por la fórmula empírica:



Donde M es el catión de valencia n, w es el número de moléculas de agua y la razón y/x generalmente toma valores de 1 a 5, dependiendo de la estructura. La suma de (x+y) es el número total de tetraedros en una celda unitaria. La porción contenida entre los corchetes [] representa la composición del armazón. (Breck, 1974)

La tabla 2.3 muestra algunas propiedades físicas más importantes de las zeolitas.

Tabla 2.3: fórmulas representativas y algunas propiedades físicas de las zeolitas más importantes.

Zeolita	Formula de una celda unitaria representativa	Vol. vacío	Dimensiones de los canales	Estabilidad termal	Capacidad de intercambio iónico
Analcita	$Na_{12}[(AlO_2)_{16}(SiO_2)_{32}] \cdot 16H_2O$	18%	2.6 Å	Alta	4.54 meq/g
Chabazita	$Ca_2[(AlO_2)_4(SiO_2)_6] \cdot 13H_2O$	47	3.7 x 4.2	Alta	3.81
Clinoptinolita	$Na_6[(AlO_2)_6(SiO_2)_{30}] \cdot 24H_2O$	39 ?	3.9 x 5.4	Alta	2.54
Erionita	$(Ca, Mg, Na_2, K_2)_{4.5}[(AlO_2)_9(SiO_2)_{27}] \cdot 27H_2O$	35	3.6 x 5.2	Alta	3.12
Faujasita	$(Ca, Na_2)Al_2Si_5O_{14} \cdot 10H_2O$	47	7.4	Alta	3.39
Ferriorita	$Na_{1.5}Mg_2[(AlO_2)_{5.5}(SiO_2)_{30.5}] \cdot 18H_2O$		4.3 x 5.5 3.4 x 4.8	Alta	2.33
Heulandita	$Ca_4[(AlO_2)_8(SiO_2)_{28}] \cdot 24H_2O$	39	4.0 x 5.5 4.4 x 7.2 4.1 x 4.7	Baja	2.91
Laumonita	$Ca_4[(AlO_2)_8(SiO_2)_{10}] \cdot 16H_2O$		4.6 x 6.3	Baja	4.25
Mordenita	$Na_8[(AlO_2)_8(SiO_2)_{40}] \cdot 24H_2O$	28	2.9 x 5.7 6.7 x 7.0	Alta	2.29
Filipsita	$(K, Na)_{10}[(AlO_2)_{10}(SiO_2)_{22}] \cdot 20H_2O$	31	4.2 x 4.4 2.8 x 4.8 3.3	Baja	3.87
Linde A	$Na_{12}[(AlO_2)_{12}(SiO_2)_{12}] \cdot 27H_2O$	47	4.2	Alta	5.48
Linde X	$Na_{56}[(AlO_2)_{56}(SiO_2)_{106}] \cdot 264H_2O$	50	7.4	Alta	4.73

La estructura de las zeolitas es una trama de tetraedros SiO_4 y AlO_4 en la que cada oxígeno situado en un vértice está compartido entre dos tetraedros, como se muestra en la Figura 2.5. La red tiene una deficiencia de carga neta, la cual es balanceada por cationes de gran tamaño (Ca, Na o K) que se disponen dentro de los espacios reticulares. Estos cationes no se encuentran retenidos con firmeza en

una estructura rígida, como sucede con los feldespatos, sino que pueden reemplazarse libremente dentro del sistema de huecos y canales que pueden ser intercambiados. (Besoin, 1985).

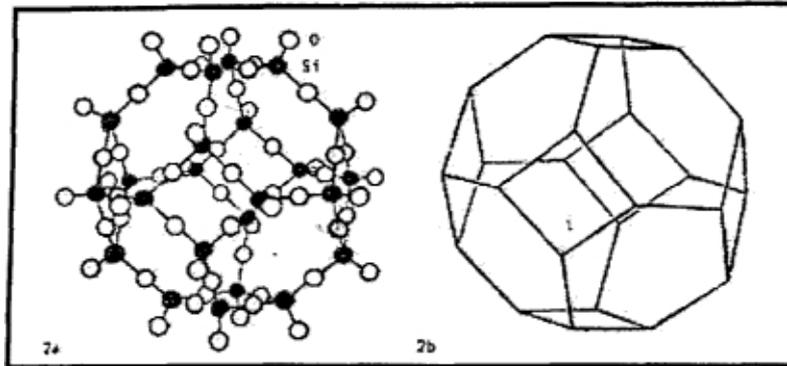


Figura 2.6: polihedro simple de silicato y aluminio formado por varios tetrahedros. (●) silicio y (○) oxígeno

Un entramado de los tetrahedros de las zeolitas en distribución tridimensional produce cavidades entre ellos. La unión de las cavidades origina un sistema de canales, los cuales pueden ligarse de diferentes formas.

La unidad fundamental de la zeolita es un tetrahedro que forma complejos que consisten en una catión pequeño como el Si^{+4} en una coordinación tetrahédrica con cuatro oxígenos (primera ley de Pauling). El ión Al^{3+} generalmente se coordina tetrahédricamente o bien octahédricamente con oxígenos en silicatos, induciendo un balance de cargas negativas en los canales internos o en la superficie externa de la zeolita. Estas cargas son neutralizadas mediante cationes como Na^+ , K^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} , dándole a la zeolita una capacidad de intercambio catiónico. (Cadena et. al. 1993)

2.4.3 Propiedades y aplicaciones.

Las zeolitas forman un gran grupo de aluminosilicatos con alrededor de 35 tramas de estructuras conocidas, con diferentes topologías y un número infinito de arreglos.

Las interpretaciones recientes de las propiedades físicas y químicas de las zeolitas están basadas sobre el conocimiento de su estructura. Actualmente existe información sobre la estructura de alrededor de 35 zeolitas. Algunas propiedades importantes de las zeolitas tienen una interpretación sobre la base del conocimiento de su estructura.

Algunas propiedades de las zeolitas son:

1. Tiene un alto grado de hidratación

2. Baja densidad y gran "volumen vacío" cuando están deshidratadas.
3. Estabilidad de la estructura cristalina de muchas zeolitas cuando se deshidratan y cuando, a lo más el 50% en volumen del cristal deshidratado está vacío.
4. Propiedad de intercambio catiónico.
5. Tamaño molecular uniforme de los canales en los cristales deshidratados.
6. Algunas de las propiedades físicas son debidas a la conductividad eléctrica.
7. Adsorción de gases y vapores.
8. Propiedades catalíticas. (Breck, 1974)

La capacidad de las zeolitas de ser intercambiadores catiónicos naturales les ha dado una gran variedad de aplicaciones como adsorbentes. En la literatura se registran investigaciones encaminadas a la remoción de cationes como el cromo hexavalente (Cadena, et. al, 1993) o metales pesados (Zamzow, et. al. 1990)

Existen diversas aplicaciones que tiene la zeolita en base a sus propiedades. Dichas aplicaciones se pueden clasificar en tres tipos: como intercambiador iónico, como absorbente de gases y como catalizador. (Manly, et. al., 1989)

Los canales con los que cuenta la zeolita actúan como una esponja capaz de separar mezclas complejas. Una de sus aplicaciones es la separación de amoníaco y ácido sulfídrico en las excreciones de animales de granjas. En la agricultura se utiliza como modificador de suelos, fijando el nitrógeno y el potasio que provienen de los fertilizantes, aumentando el aprovechamiento por la planta.

Otra aplicación de la zeolita en aditivos alimenticios de aves, ganado porcino y ganado vacuno. La adición de zeolita a la dieta animal ocasiona que el alimento permanezca más tiempo en el sistema digestivo, obteniéndose un incremento en la eficiencia calorífica debida a la conversión alimenticia que se traduce como una ganancia de peso pero en forma rápida. (Mumptom, et. al. 1977)

2.5 Zeolitas modificadas por un ion orgánico.

Breck, en 1977 define el término de zeolita modificada como " el término que ha sido usado para describir un amplio rango de materiales que se encuentran clasificados dentro de un rango de productos de un simple intercambio iónico, a la descomposición de productos resultantes de la completa destrucción cristalina". En el presente trabajo, la modificación de la zeolita consiste en la adición de una molécula orgánica, que en este caso es el cloruro de cetilpiridinio, también conocido como agente modificante que tiene la propiedad de invertir la carga negativa de la zeolita natural y convertirla en un intercambiador aniónico, capaz de remover especies cargadas negativamente. (Cadena, et. al. 1993) La utilización de este agente modificante en base al resultado positivo que se ha tenido en investigaciones anteriores. (Jiménez, 1994) Este compuesto proporciona cationes

de cetilpiridinio, quienes se encuentran cargados positivamente debido al nitrógeno trivalente presente en el grupo piridín. (ver Figura 2.6)

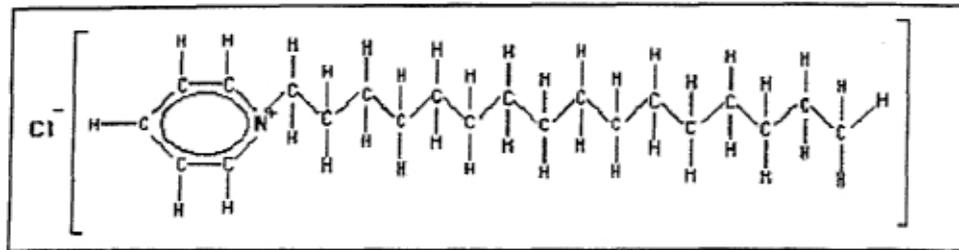


Figura 2.7: molécula de cloruro de cetilpiridinio ($C_{12}H_{38}N^+Cl^-$, Peso molecular 304 g/mol)

El mecanismo de la modificación se describe dividiendo fenómeno en dos fases. La primera consiste en atracciones electrostáticas entre la superficie de la zeolita que se encuentra cargada negativamente y las cargas del catión cetilpiridinio que resultan después de intercambiar iónicamente el cetilpiridinio con los contraiones de la zeolita. La segunda corresponde a la unión mediante fuerzas de Van del Waals (VDW) entre las partes organofílicas del agente modificante, es decir la cadena alifática lineal, una vez que se ha agregado un exceso de agente modificante con relación a la capacidad de intercambio catiónico externa de la zeolita. De esta forma las cadenas de carbono de el ion cetilpiridinio que están en exceso quedan unidas por las fuerzas de VDW y conservan su carga positiva, como se puede apreciar en la Figura 2.7.

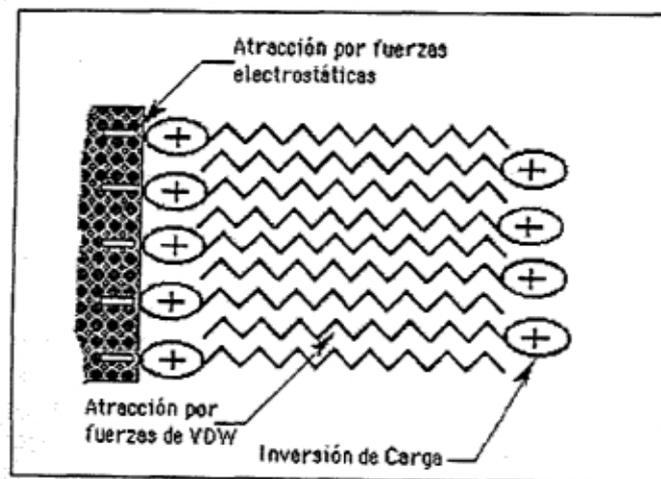


Figura 2.8: segunda fase del fenómeno de modificación.

De esta forma se logra una neutralización de la carga negativa de la zeolita al saturarse la capacidad de intercambio catiónico externa, pero como se está agregando a la superficie de la zeolita moléculas de agente modificante, que al estar unidos únicamente por fuerzas de Van del Waals conservan su carga positiva, logrando así la inversión de la carga de la zeolita convirtiéndose en una

estructura cargada positivamente gracias a la modificación en su superficie. Además esta estructura exhibe como propiedad el carácter hidrofóbico propio de las especies alquílicas.

Trabajos realizados por Jiménez (1994) y por Cadena et. al. (1993) han demostrado que las zeolitas modificadas en esta forma presentan un comportamiento de adsorción distinto a las zeolitas naturales, trayendo como consecuencia la remoción de sustancia neutras o bien cargadas negativamente.

Capítulo 3

Materiales y metodología

3.1 Introducción

En el este capítulo se enlistan los materiales, equipos y reactivos que se utilizaron en el presente trabajo de investigación, así como también la metodología empleada en la experimentación y la descripción de las pruebas utilizadas.

La experimentación se puede dividir en cuatro fases.

- a. Pruebas con arcilla activada
- b. Pruebas con zeolita natural
- c. Pruebas con zeolita modificada con Cloruro de cetilpiridinio
- d. Repetición de las pruebas más significativas utilizando una muestra artificial.

Las tres primeras se realizaron con agua proveniente del efluente de la empresa de teñido de alfombras. Se tomaron muestras de diferentes lotes y con diferentes características, principalmente en lo referente al tipo de colorantes.

La experimentación consiste principalmente en la realización de pruebas de jarras y pruebas de adsorción.

3.2 Materiales, equipo y reactivos utilizados

Se utilizo un espectrofotómetro Hach DR/4000u para la medición de color y la demanda química de oxígeno (DQO). El espectrofotómetro tiene un menú de

pruebas identificadas por números. Los métodos están basados en los registrados en el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.

La medición de color se realizó mediante el método 1660, en la mayoría de los casos, válido para un rango de 0 a 250 unidades de Pt-Co. El método que utiliza este programa es el ADMI Weighted Ordinate Method, donde ADMI significa Instituto Americano de Fabricantes de Colorantes, en sus siglas en inglés. El límite de detección estimado para este método es de 3 ADMI.

En algunas ocasiones, el color obtenido se está fuera del rango de medición de este método, teniéndose que utilizar el programa 1680 para medir el color verdadero y aparente, con un rango que va de 0 a 500 unidades Pt-Co, con un límite de detección estimado de 2 unidades Pt-Co. En ambos métodos, se midió el color verdadero, es decir, se filtraba la muestra para eliminar el material suspendido que pudiera ocasionar interferencia. Se conoce como color aparente aquel que se obtiene en presencia de materia en suspensión.

El espectrofotómetro Hach también se utilizó para la medición de la demanda química de oxígeno (DQO) utilizando el programa número 2720. El programa está diseñado para obtener los resultados en mg/l de DQO, en un rango que va de 0 a 1500 mg/l. La metodología para la preparación de las muestras se tomó del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 17th edición y extraídos del libro *Selected Physical and Chemical Standard Methods for Students*.

Para la medición de la turbidez, se utilizó un turbidímetro marca Orbeco-Hellige.

El pH se midió con un medidor de pH marca Hach, calibrándolo con soluciones estándares de pH 7.0 y 4.0

Las pruebas de jarras se realizaron con un equipo de 6 agitadores con propelas tipo pala, con regulador de velocidad de agitación en revoluciones por minuto que va de 0 a 200 r.p.m. El material, reactivos y equipo utilizado se resume en el Apéndice A.

3.3 Metodología

La metodología empleada se puede resumir en el diagrama de las Figuras 3.1 y 3.2.

Debido al desconocimiento del tipo de molécula de color presente en la muestra del efluente, y por consiguiente, el desconocimiento del comportamiento químico de dichas moléculas, la metodología está diseñada para determinar en forma indirecta, cuál es la carga eléctrica predominante de las moléculas de color contenidas en el efluente a diferentes condiciones de pH. Para apoyar la investigación se realizó una revisión bibliográfica del comportamiento químico de

algunos grupos funcionales que se presentan en los colorantes dispersos para tratar de explicar los resultados obtenidos de la experimentación.

La arcilla utilizada es bentonita activada mediante ácido sulfúrico. Se realizaron pruebas con arcilla activada en tres diferentes condiciones: arcilla (únicamente),

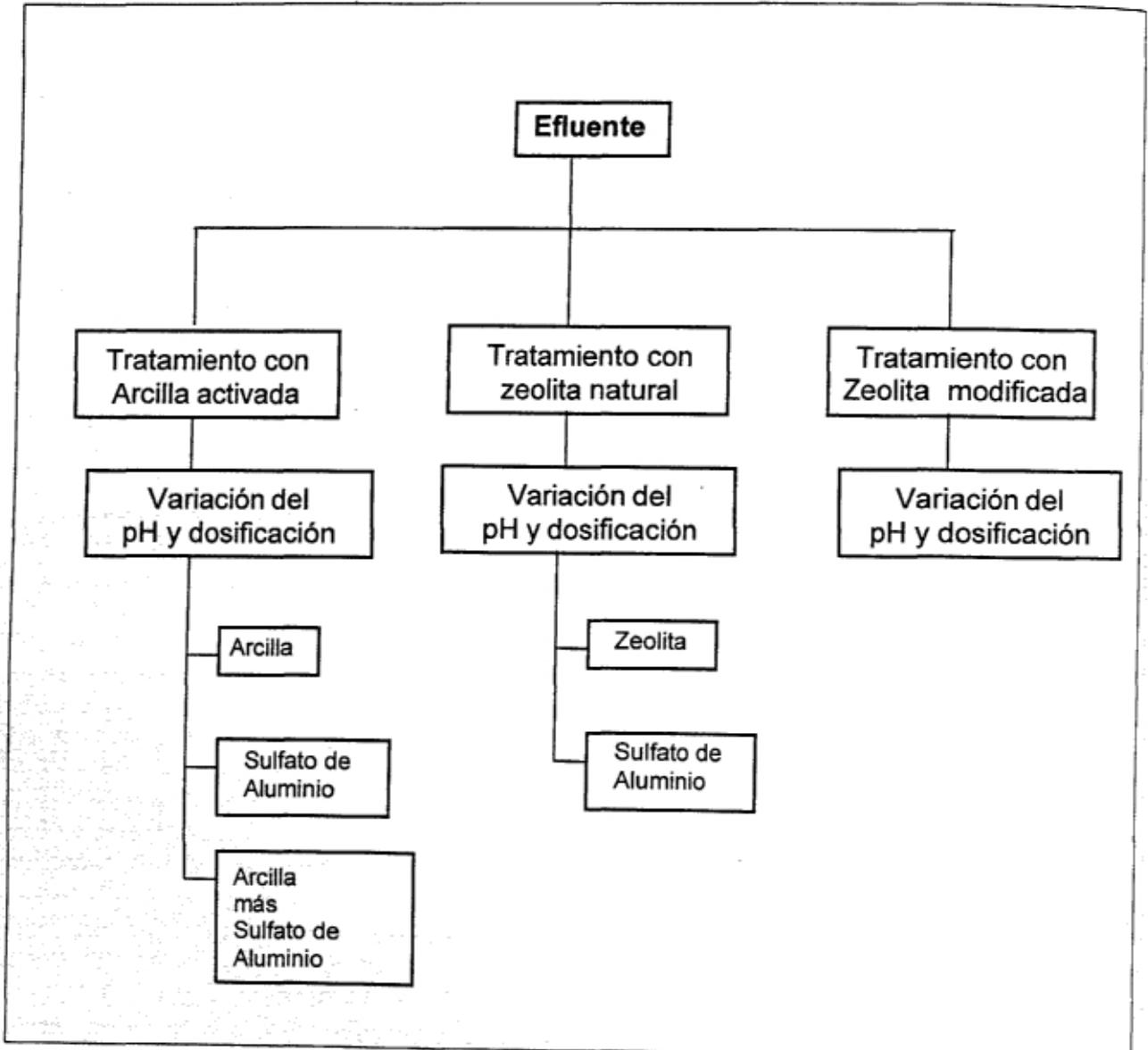


Figura 3.1: pruebas para el efluente de la industria del teñido de alfombras.

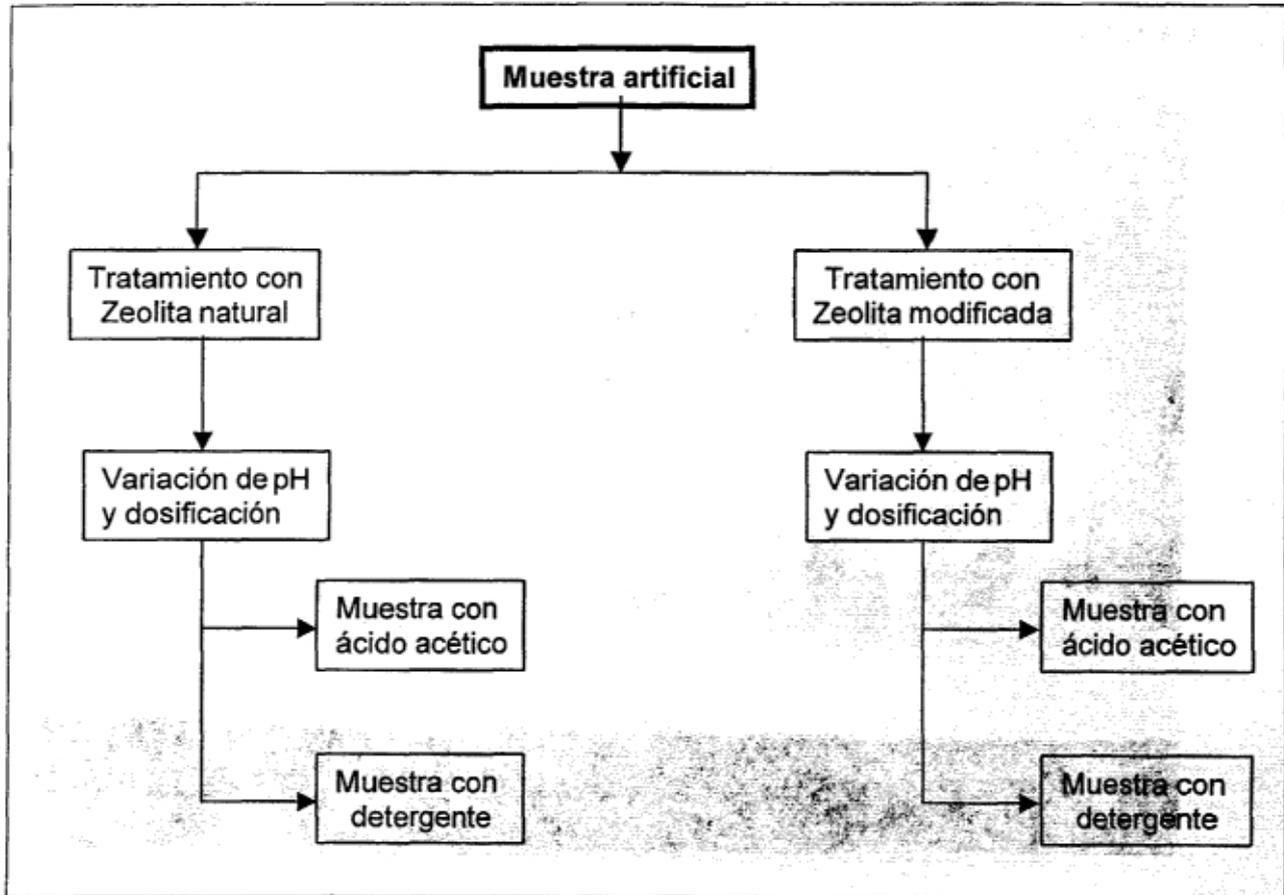


Figura 3.2: pruebas realizadas para la muestra artificial.

sulfato de aluminio (únicamente) y una combinación de arcilla con sulfato de aluminio.

La zeolita utilizada es proveniente de un yacimiento ubicado en el estado de Sonora. La caracterización de la zeolita fue realizada por Jiménez (1994), esta incluye la granulometría además de la determinación de algunas propiedades físicas como la distribución de tamaño de partícula, determinación del tamaño efectivo de la muestra, coeficiente de uniformidad, diámetro principal de la partícula, diámetro medio geométrico y desviación estándar geométrica, densidad aparente, por mencionar algunos.

Con zeolita natural se realizaron pruebas donde se modificaron los pH de las muestras con el fin de ver el efecto en la adsorción en la zeolita al modificar las condiciones de pH que probablemente tienen un efecto sobre la carga eléctrica de

la molécula de color. Las mismas pruebas que se hicieron con zeolita natural, también se realizaron con zeolita modificada con cloruro de cetilpiridinio.

La Figura 3.3 muestra un fotografía del aparato de la prueba de jarras utilizado en la experimentación

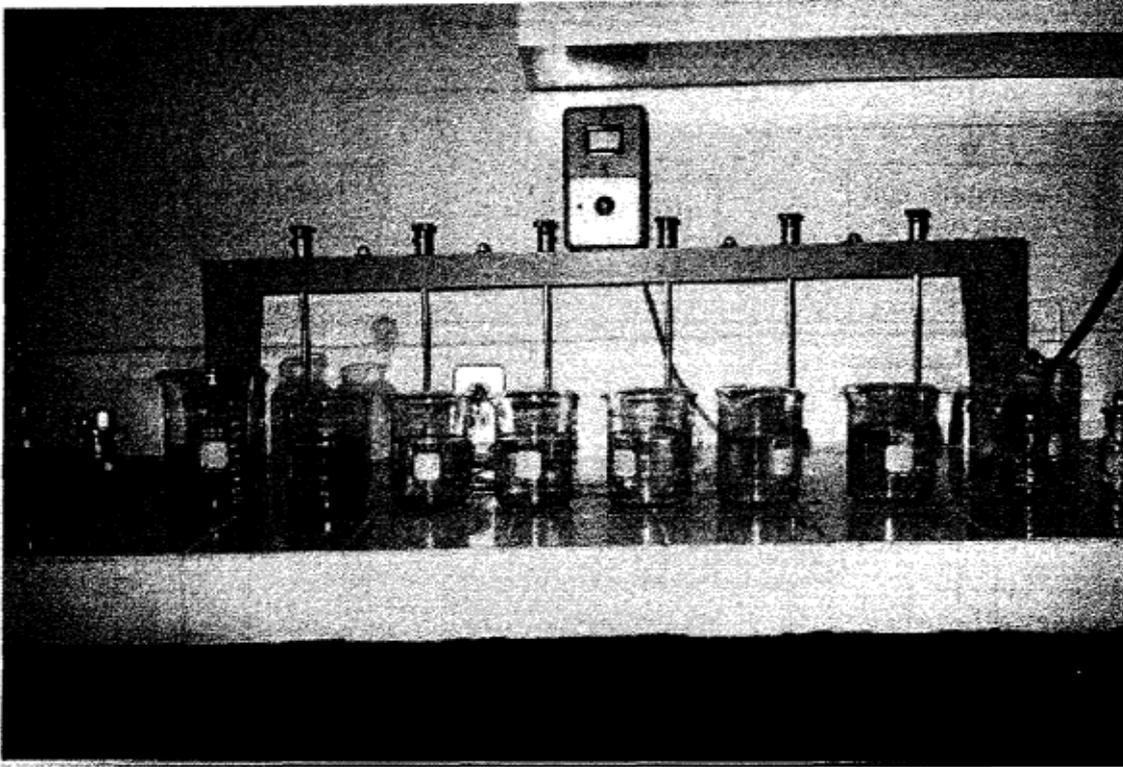


Figura 3.3: equipo de la prueba de jarras.

3. 4 Parámetros a medir.

Los parámetros que se midieron durante la experimentación fueron: color, DQO, turbidez y pH.

A. Color verdadero.

La medición de este parámetro se logra filtrando la muestra de agua antes de hacer la medición en el espectrofotómetro, de esta forma se eliminan las interferencias que se pudieran generar por el material suspendido de la muestra.

Para medir las expresiones de color se utilizó un espectrofotómetro Hach DR/4000 utilizando los programas 1660 para medir unidades ADMI y 1670 para medir unidades Pt-Co. El primer método tiene un rango de 0 a 250 unidades ADMI, mientras que el segundo tiene un rango de 0-500 unidades Pt-Co.

En la última etapa de la experimentación se utilizó una curva de calibración elaborada a partir de una solución de Pt-Co de concentración conocida y la interpolación de los valores de absorbancia medidos en un espectrofotómetro. Se tomó la decisión de cambiar de método debido al mal funcionamiento del espectrofotómetro Hach DR/4000u. En el Apéndice B se muestra la curva de calibración utilizada.

B. DQO.

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es una medición indirecta de la cantidad de materia orgánica presente en la muestra, susceptible a oxidarse mediante el uso de un oxidante químico fuerte. Se expresa en mg por litro de O₂ necesario para la oxidación del material orgánico.

Este parámetro es evaluado para relacionar la remoción de color con la reducción de materia orgánica presente en el agua relacionada con el color. En el caso de existir remoción de color, se verá el comportamiento de la remoción de DQO para hacer una relación de la cantidad de moléculas de color presentes en la muestra. Para la medición de la DQO se utilizó también el espectrofotómetro Hach, con el programa 2720 que expresa los resultados en mg/l de DQO. El rango de medición para esta prueba es de 0 a 1500 mg/l de DQO.

C. Turbidez.

La turbidez se midió con un turbidímetro marca Orbeco – Hellige, obteniéndose unidades nefelométricas de turbidez o Nephelometric Turbidity Unit (NTU), con sus siglas en inglés. La prueba mide la turbidez, la cual es una propiedad óptica de la muestra que resulta de la difracción y absorción de la luz que incide en las partículas contenidas en la muestra.

La cantidad de turbidez depende del tamaño, la forma, color y propiedades refractivas de las partículas presentes. Antes de hacer la medición de la turbidez de la muestra se ajusta el turbidímetro a cero con una solución de color negro y después se calibra con soluciones de turbidez conocida de 200 y 40 NTU.

D. pH.

El pH es un factor que afecta las propiedades de la molécula de color, por lo que es importante hacer una medición continua de este parámetro en las diferentes pruebas a realizar para la remoción de color, tanto con arcilla activada como con zeolita.

Para la medición del pH se utilizó un medidor de pH marca Hach que se calibra con soluciones de pH conocido de 4.0 y 7.0.

3.5 Pruebas con arcilla activada.

Activación de la arcilla.

La activación de la arcilla fue hecha por el proveedor de la arcilla decolorante. La activación se realizó con ácido sulfúrico que tiene como finalidad la descomposición parcial de la arcilla para aumentar su capacidad de adsorción ya que remueve algunos iones octahédricos de aluminio, hierro y magnesio, con lo que resulta una partícula altamente cargada y saturada con iones hidrógeno, lo que las convierte en arcillas factibles de decolorar soluciones (Mickelson, 1966)

Metodología

En los experimentos realizados, las pruebas están encaminadas a corroborar el efecto adsorbente de la arcilla activada y diferenciar su efecto adsorbente del efecto que tiene el coagulante recomendado por el proveedor del producto para la remoción posterior de la arcilla. En este sentido se realizaron pruebas expresadas en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Metodología para evidenciar el efecto adsorbente de la arcilla activada.

	pH ácido	pH neutro
Arcilla	Medición de parámetros	Medición de parámetros
Sulfato de aluminio	Medición de parámetros	Medición de parámetros
Arcilla y Sulfato de aluminio	Medición de parámetros	Medición de parámetros

En el caso de los experimentos con arcilla se realizaron pruebas de jarras con dosis de 80, 90, 100, 110, 120, 130 ppm de arcilla. Cuando se utilizó sulfato de aluminio, se emplearon dosis de 50, 100, 150, 200, 250, 300 ppm. Cuando se combinó el uso de arcilla con sulfato de aluminio, se utilizaron las mismas dosis de arcilla sólo que la cantidad de sulfato de aluminio permaneció constante e igual a 100 ppm, de tal forma que en caso de existir un efecto adsorbente por parte de la arcilla, este se evidenciará al aumentar la dosis ya que la concentración de coagulante permanece constante para cada jarra.

3.6 Pruebas con zeolita natural.

A. Pruebas preliminares.

Se realizaron pruebas preliminares para la determinación de la dosis adecuada de zeolita. Primeramente se emplearon dosis de 80, 90, 100, 110, 120 y 130 ppm de zeolita, con una dosis constante de 100 ppm de sulfato de aluminio para eliminar

posteriormente la turbidez producida por la zeolita. De los resultados de estas pruebas preliminares se decide aumentar la dosis de zeolita a 10, 20, 30, 40, 50 y 60 g/l para cada jarra.

B. Metodología.

Con las nuevas dosis de arcilla se efectuaron pruebas a pH ácido y básico para determinar el efecto de este factor en la adsorción. Se utilizó sulfato de aluminio en algunas pruebas y en otras solo se utilizó la zeolita. La metodología se puede representar en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 metodología para evidenciar el efecto adsorbente de la zeolita natural.

	pH ácido	pH básico
Zeolita natural	Medición de parámetros	Medición de parámetros
Zeolita natural y Sulfato de aluminio	Medición de parámetros	Medición de parámetros

La metodología se orienta fundamentalmente a medir el efecto de adsorción de las moléculas que ocasionan color en la muestra, por la zeolita natural, debido a que esta contiene cargas negativas que pueden realizar un intercambio iónico con las moléculas de color. Debido a que el pH modifica la estructura de algunas moléculas de color, se hace una variación del ambiente en el que se realizan las pruebas en pH ácido y pH básico.

3.7 Pruebas con zeolita modificada.

A. Modificación de la zeolita.

Para la modificación de la zeolita se siguió el método expuesto por Santiago et. al., 1992. La técnica consiste en lograr una suspensión de 100 g/l de zeolita en agua destilada y agregar la cantidad correspondiente de cloruro de cetilpiridinio para lograr la dosis deseada, mediante la suspensión en agitación durante 60 minutos, para posteriormente dejarla reposar por un período de 24 horas. Posteriormente las zeolitas son lavadas dos veces con agua destilada para eliminar el exceso de agente modificante y se secan en la estufa a 100° C por 12 horas.

B. Metodología

La zeolita modificada tiene la propiedad de ser un intercambiador aniónico. Con este antecedente se realiza una metodología enfocada a ver el efecto de

adsorción de la zeolita modificada sobre las moléculas de color a diferentes valores de pH de la muestra. La metodología se puede resumir en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: metodología para la zeolita modificada

	pH ácido	pH básico
Zeolita modificada	Medición de parámetros	Medición de parámetros

En estos experimentos no se utilizó sulfato de aluminio, para evidenciar el efecto adsorbente de la zeolita modificada y que no se viera interferida por otro factor.

Esta decisión se tomó debido a que el sulfato de aluminio no representa gran utilidad como coagulante a valores de pH extremadamente ácidos o extremadamente alcalinos.

3.8 Pruebas con muestra artificial.

Se realizó la repetición de algunas de las pruebas más significativas en función a los resultados obtenidos, pero utilizando una muestra artificial de color, para hacer la comparación del efecto adsorbente con la muestra original que contiene una serie de químicos adicionales, con una muestra que contiene únicamente color.

La muestra preparada es una solución de 0.05 g/l de colorante azul proporcionado por la empresa del ramo textil. Dicho colorante es de tipo disperso, poco soluble en agua y más afín a la fibra sintética.

A. Pruebas con zeolita natural

Se realizaron pruebas con zeolita natural a dos diferentes valores de pH: ácido y básico. El propósito de este experimento es evaluar si la zeolita natural es capaz de adsorber el colorante, únicamente sin interferencia de otros componentes, además de evaluar el efecto del pH en el proceso.

B. Pruebas con zeolita modificada

Se realizaron pruebas con zeolita modificada químicamente a dos diferentes valores de pH: ácido y básico. Al igual que con la zeolita natural, el propósito es evaluar la capacidad de adsorción de este tipo de zeolita a diferentes valores de pH.

C. Muestra artificial con colorante, detergente y ácido acético

En función de los resultados obtenidos en los experimentos anteriores, se evaluó el efecto del ácido acético y de los detergentes sobre el proceso de adsorción, dado que en la muestra original, estos componentes están presentes. De esta forma se pudo evaluar el efecto que tienen durante el proceso de adsorción de color.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

Se realizaron series de experimentos los cuales se pueden clasificar en tres grupos

- a). Pruebas con arcilla bentonítica, cuyo nombre comercial es arcilla decolorante
- b). Pruebas con zeolita, tanto en forma natural, como modificada con cloruro de cetil piridinio.
- c). Repetición de las pruebas más significativas con una muestra artificial.

Un diagrama de flujo de los experimentos se puede observar en el Apéndice C y los resultados de los experimentos en el Apéndice D. Dichos resultados fueron modificados en una hoja de cálculo para expresarlos generalmente en función de los porcentajes de variación de color, turbidez y DQO.

4.1 Pruebas con arcilla bentonítica decolorante.

Las arcilla bentonítica tiene la capacidad natural de intercambiar iones positivos, ya que tienen una capa de carga negativa, debida a una sustitución isomórfica entre los iones de menor valencia por iones de mayor valencia (Al^{+3} por los iones Si^{+4}). (Zhu, 1997). Esta propiedad es utilizada para tratar de remover el color del efluente de una industria textil en caso de que los colorantes tienen cargas predominantemente positivas.

La arcilla que se utiliza en los experimentos permanece en suspensión por lo que es necesario removerla una vez que haya terminado el proceso de adsorción de

color. Se utilizó sulfato de aluminio como coagulante para la remoción de la arcilla y se idearon experimentos para diferenciar el efecto de remoción de la arcilla contra el efecto de remoción del sulfato de aluminio. Los experimentos consistieron en probar únicamente arcilla para la remoción de color, probar únicamente sulfato de aluminio para la remoción de color y probar arcilla seguida de una dosis de sulfato de aluminio. La metodología experimental anterior permitió diferenciar el efecto de remoción de la arcilla con respecto al efecto de remoción del sulfato de aluminio. El efecto coagulante del sulfato de aluminio se ve influido por el pH debido a que su solubilidad varía con el pH. Por lo anterior se planearon experimentos a diferentes valores de pH.

Se realizaron pruebas con arcilla bentonítica decolorante a dos diferentes valores de pH, uno con pH ácido y otro con pH aproximadamente neutro. En cada uno de los experimentos se midieron los siguientes parámetros: pH, turbidez, color y DQO. Se decidió hacer la medición de estos parámetros como una medida de la calidad del agua, además de medir el efecto que tiene la arcilla, no solo en la remoción de color, sino también en la remoción de DQO y como afecta la adición de arcilla en la turbidez que tiene el agua debida a los componentes que contiene como dispersantes, antiespumantes, ácido acético; por mencionar algunos.

Experimento 1

En el *experimento 1* se realizaron tres pruebas de jarras, una con arcilla decolorante, otra con sulfato de aluminio y otra con arcilla decolorante y sulfato de aluminio a diferentes valores de concentración que van de 50 a 300 ppm con incrementos de 50 ppm. El pH de la muestra utilizada fue de 3.6. Los resultados se graficaron en función del porcentaje de remoción de los parámetros a medir, en este caso color, turbidez y DQO.

A valores de pH ácido, la arcilla decolorante no presenta acción adsorbente de color, lo cual se refleja en el porcentaje de remoción de 0% mostrado en la Figura 4.1. Utilizando únicamente sulfato de aluminio como coagulante, tampoco se observa acción decolorante (ver Figura 4.2), de hecho se observa un incremento de color (o una variación negativa). Lo anterior se puede explicar debido a que a estos valores de pH (ácidos) el sulfato de aluminio es muy soluble. Un efecto similar se observa al combinar arcilla decolorante y sulfato de aluminio. (Figura 4.3).

La arcilla decolorante tiene sitios superficiales que realizan un intercambio catiónico, por ello para que se observe remoción de color, las moléculas deben estar cargadas en forma positiva para poder realizar dicho intercambio catiónico.

El pH ácido proporciona un exceso de iones hidrógeno en el agua que pueden afectar el proceso de difusión y adsorción de la molécula de color en la arcilla, debido a que la difusión se da de la mayor a la menor concentración y un exceso de iones hidrógeno competirían en los procesos y adsorción en la zeolita. Para demostrar la hipótesis anterior es necesario realizar un experimento con pH

básico. La acción coagulante del sulfato de aluminio depende del pH y la dosis utilizada. De acuerdo con el diagrama de solubilidad para el sulfato de aluminio (Apéndice E), con las dosis utilizadas en el experimento 1 y con pH = 3.6, el sulfato de aluminio se presenta en especies solubles, por lo que su acción coagulante es muy débil a las dosis utilizadas. (Amirtharajah, 1982)

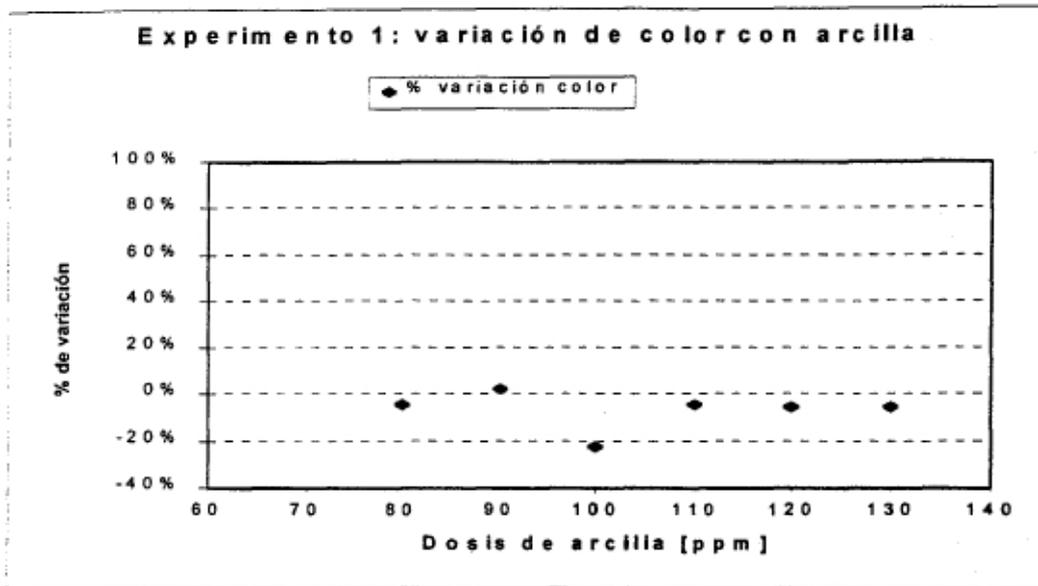


Figura 4.1: variación de color con sulfato de aluminio a pH inicial de 3.6.

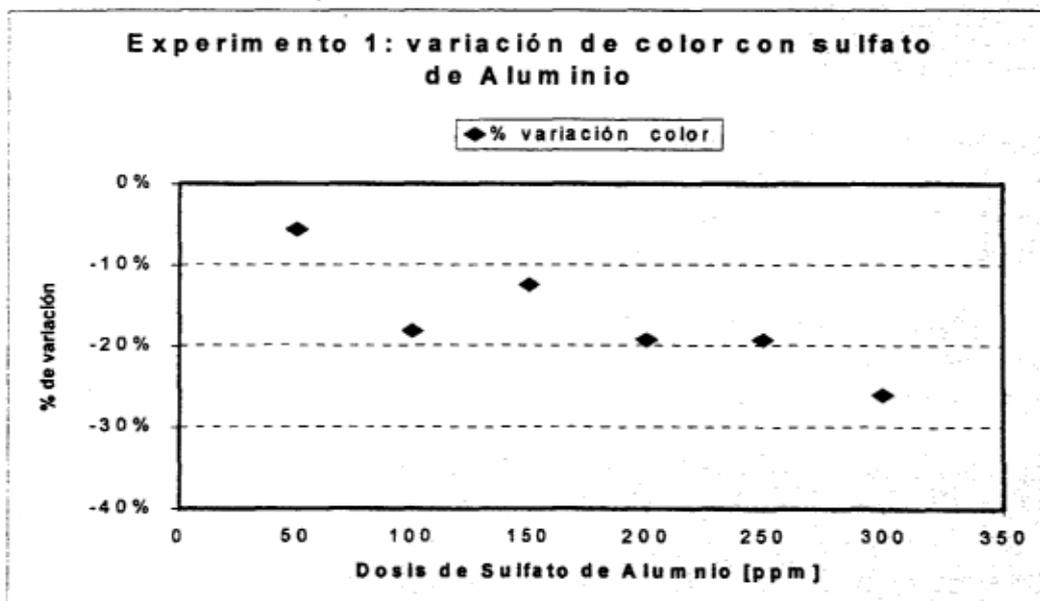


Figura 4.2: variación de color con sulfato de aluminio a pH inicial 3.6.

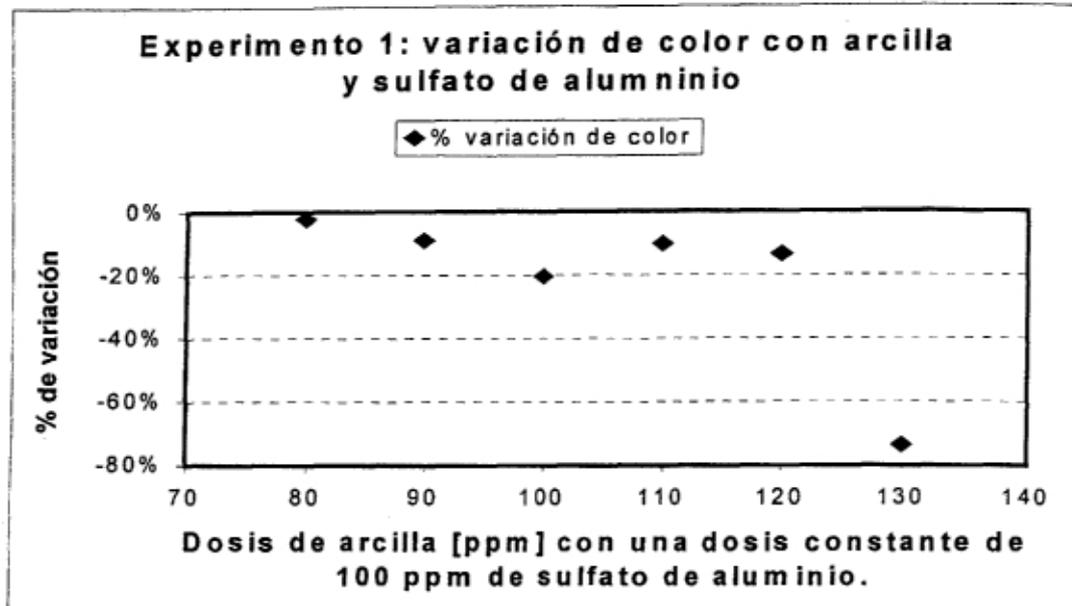


Figura 4.3: variación de color una combinación de arcilla y sulfato de aluminio a pH inicial de 3.6

En el caso de la turbidez, no se observa remoción con la arcilla decolorante como se puede apreciar en la Figura 4.4. Utilizando sulfato de aluminio la turbidez aumenta, debido al pH de la muestra y a la solubilidad del sulfato de aluminio (Figura 4.5). Resultados similares se obtienen al combinar la arcilla y el sulfato de aluminio (Figura 4.6).

Al adicionar arcilla, la turbidez de la muestra permanece constante, lo que se refleja en un porcentaje de remoción casi nulo. Este resultado no tiene una explicación aparente, ya que era de esperar un aumento en la turbidez al ir incrementando la dosis de arcilla por lo que se repitió en el experimento 2.

Para el sulfato de aluminio se observa un aumento en los niveles de turbidez, ya que las especies predominantes a este valor de pH y a las concentraciones utilizadas permanecen solubles, lo que incrementa la turbidez del agua residual.

Cuando se combinan la arcilla y el sulfato de aluminio, los niveles de turbidez aumentan.

En la medición de la DQO en el experimento 1 se observa un incremento del orden del 10% al 20% comparado con la DQO inicial. Nuevamente se confirma que la arcilla no tiene acción adsorbente sobre los componentes de la muestra del agua residual. Resultados similares se observaron con la adición de sulfato de aluminio y una combinación de arcilla con sulfato de aluminio, como se puede observar en las Figuras 4.7, 4.8, y 4.9 en una variación negativa.

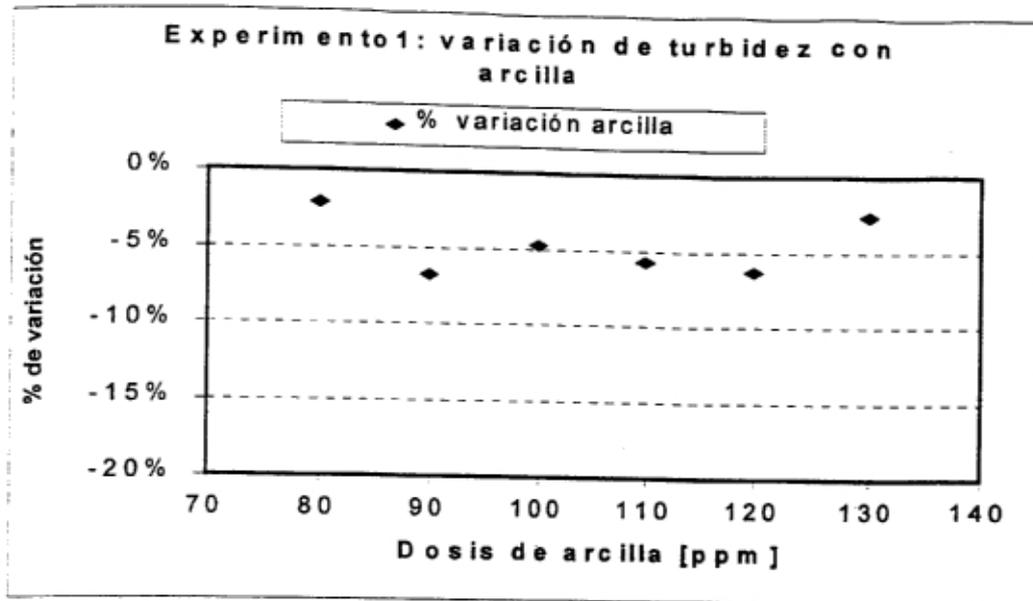


Figura 4.4: variación de turbidez con arcilla decolorante a pH inicial de 3.6

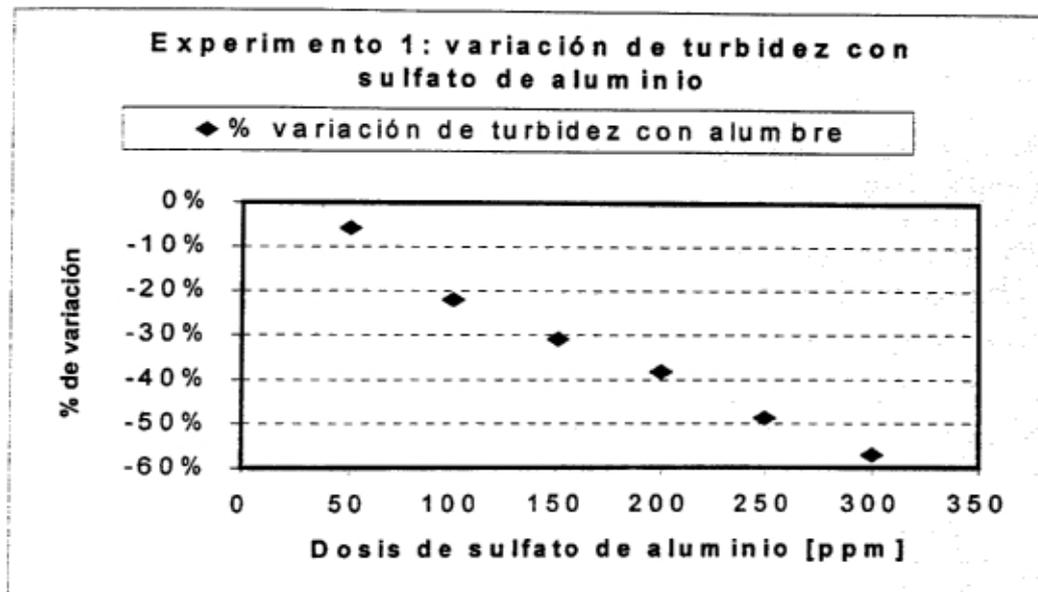


Figura 4.5: variación de turbidez con sulfato de aluminio a pH inicial de 3.6

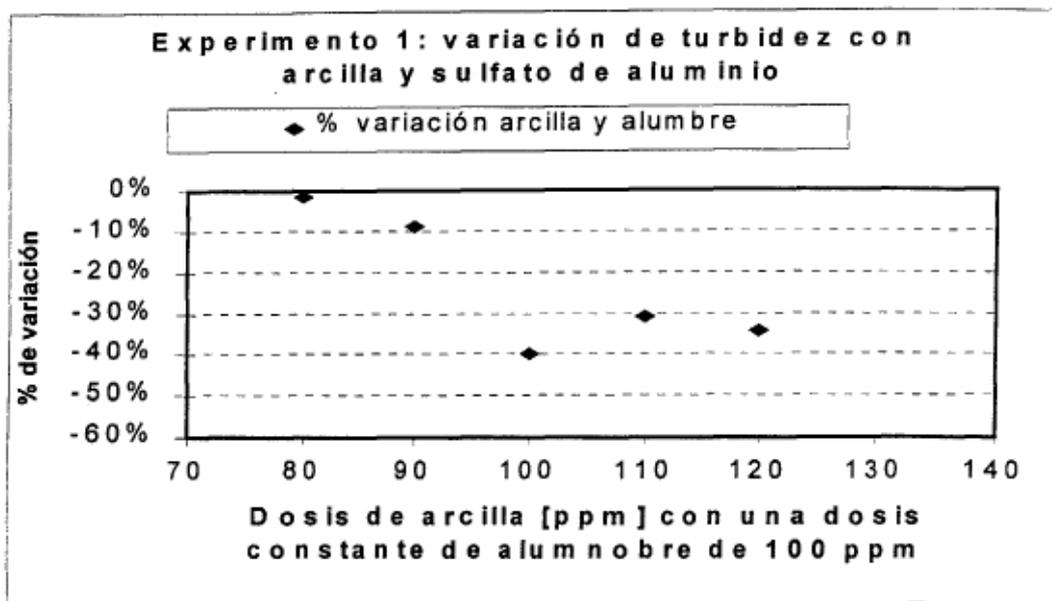


Figura 4.6: variación de turbidez con una combinación de arcilla y sulfato de aluminio a pH inicial de 3.6

Con base a los resultados obtenidos en este experimento, se concluye que la arcilla decolorante no remueve ningún tipo de compuestos contenidos en la muestra a pH de 3.6. En este mismo valor de pH, el sulfato de aluminio tampoco removió color ni DQO, en cambio hubo una contribución en el aumento de los niveles de color y DQO de la muestra.

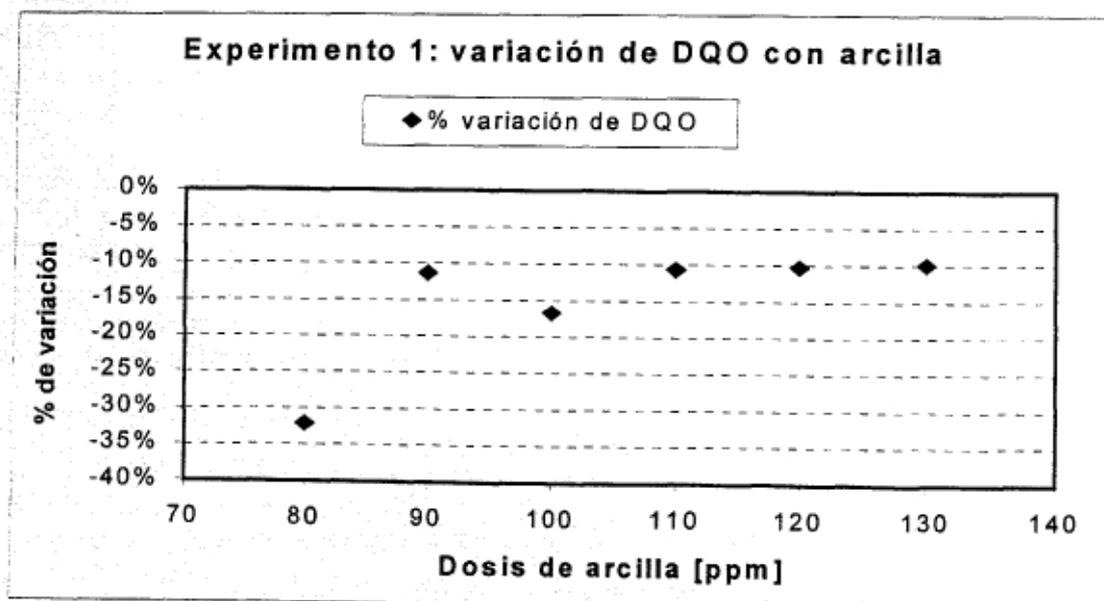


Figura 4.7: variación de DQO con arcilla decolorante a pH inicial de 3.6.

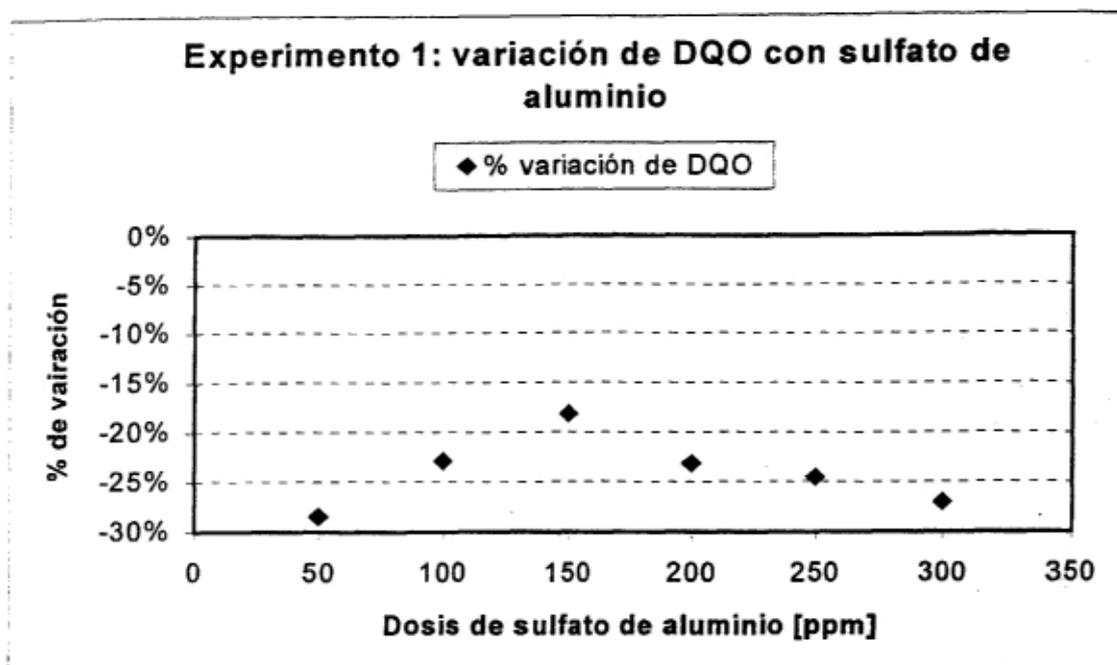


Figura 4.8: variación de DQO con sulfato de aluminio a pH inicial de 3.6

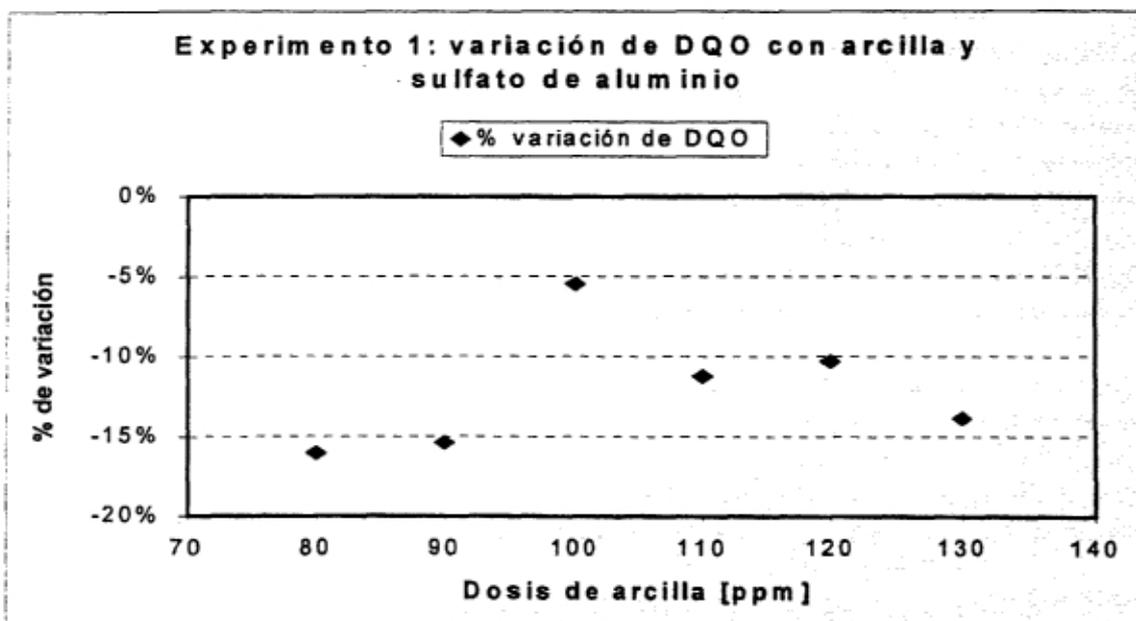


Figura 4.9: variación de DQO con arcilla decolorante y una dosis constante de sulfato de aluminio de 100 ppm a pH inicial de 3.6

Uno de los factores a los que se asume la ausencia de remoción de color, turbidez y DQO puede ser los valores iniciales de pH que tiene la muestra (pH = 3.6). La acción absorbente de la arcilla depende del intercambio iónico que se presente entre los iones H^+ de la arcilla y las moléculas de color contenidas en la muestra. Se asume que el pH es un factor determinante, ya que proporciona un ambiente con exceso de iones H^+ en la muestra que compiten con las moléculas que se desean remover.

Experimento 2

Para corroborar lo anterior expuesto se realizó una prueba a pH aproximadamente neutro. En este caso se modificó el pH de la muestra hasta llevarlo a un valor de 7.6 y se realizaron las mismas pruebas en el *experimento 2* y los resultados se explican enseguida.

En la remoción de color con arcilla se observa un comportamiento errático, ya que a concentraciones bajas se observa una aparente remoción del color, pero a medida que aumenta la concentración de arcilla se esperaría que aumentara la adsorción de color, situación que no se presenta, tal como se puede apreciar en la Figura 4.10. Los resultados obtenidos no presentan evidencia de que la arcilla bentonítica adsorba a las moléculas causantes del color debido a que no se sigue un comportamiento coherente con el aumento de concentración de la arcilla.

Al utilizar sulfato de aluminio, se observa una remoción de color del orden del 80%, que se alcanza a concentraciones entre 150 ppm y 200 ppm. (Figura 4.11) La remoción de color con sulfato de aluminio está documentada en la bibliografía. Stephenson y Duff (1996) hicieron pruebas con cloruros y sulfatos de aluminio y fierro obteniendo los rangos óptimos para la remoción de color con eficiencias hasta del 90%. Al combinar la arcilla y el sulfato de aluminio, se observa una remoción similar a la observada solo con el sulfato de aluminio, pero con remociones máximas del orden del 90 %. (Figura 4.12)

La remoción de color con sulfato de aluminio era esperada, ya que para estos valores de pH, el sulfato de aluminio forma especies insolubles, que dependiendo de la dosis utilizada y de la cantidad de arcilla presente en la muestra, puede presentar el mecanismo de barrido (como lo demuestra la presencia de precipitado en la muestra), eliminando en cierta medida la cantidad de color.

En el caso de la remoción de turbidez utilizando únicamente arcilla decolorante, se observó un aumento en este parámetro, lo que se refleja en un incremento de la turbidez. Al utilizar 100 ppm de arcilla la turbidez aumenta un orden del 50% (Figura 4.13).

El comportamiento observado no es el mismo que en el experimento 1, ya que en este no se observó un aumento en la turbidez al agregar arcilla en las concentraciones utilizadas. El comportamiento observado en el experimento 2 es

el esperado, ya que al aumentar la dosis de arcilla es de esperarse que aumenten los niveles de turbidez.

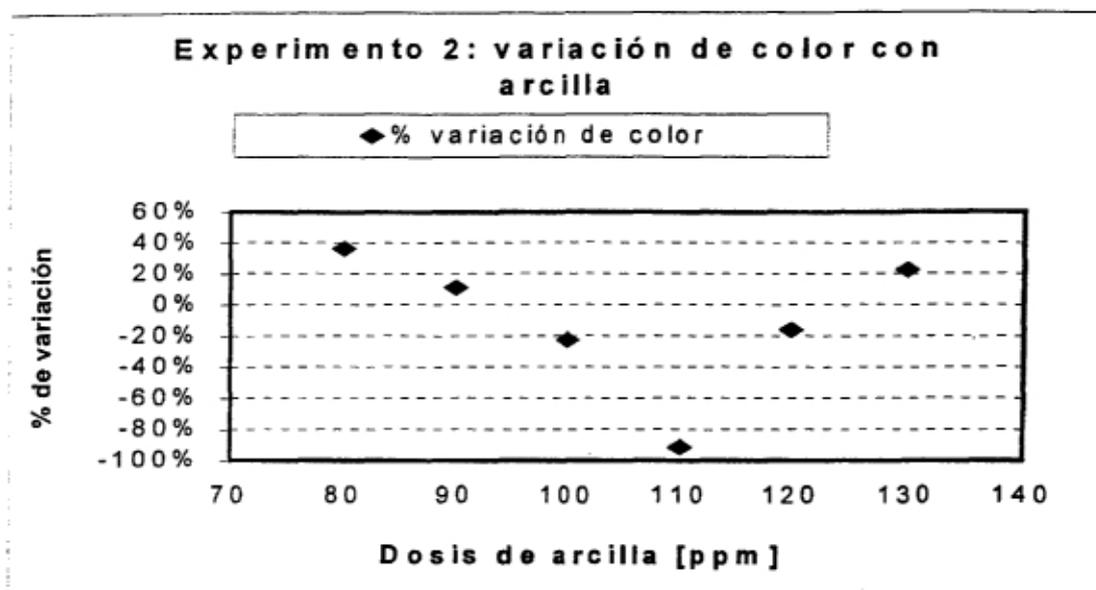


Figura 4.10: variación de color con arcilla decolorante a pH inicial de 7.6

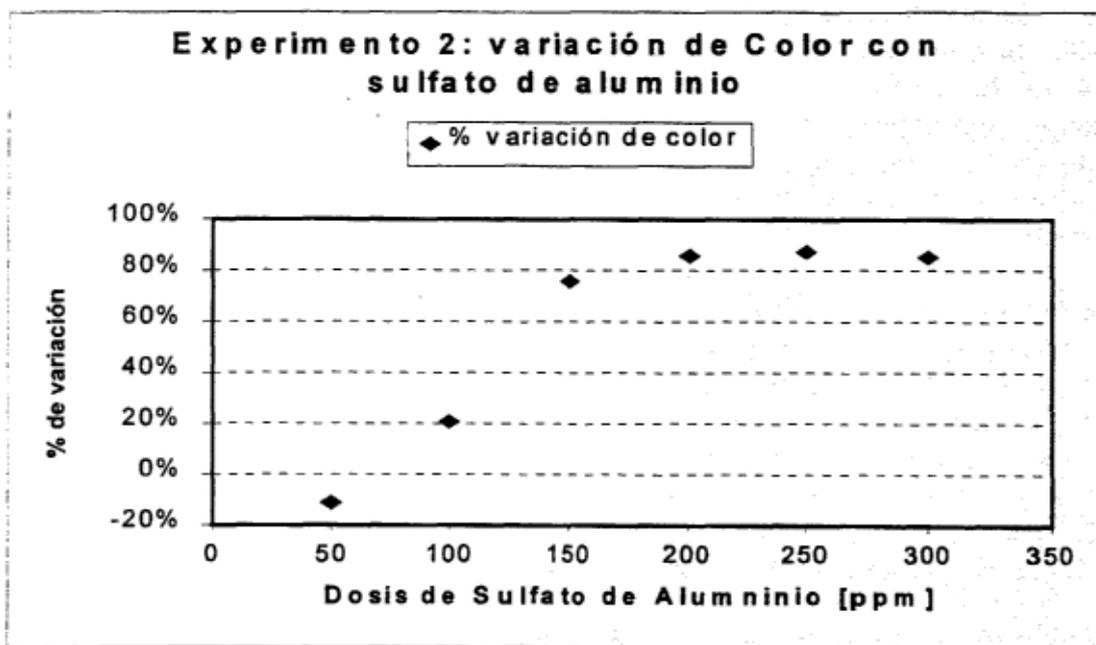


Figura 4.11: variación de color con sulfato de aluminio a pH inicial de 7.6

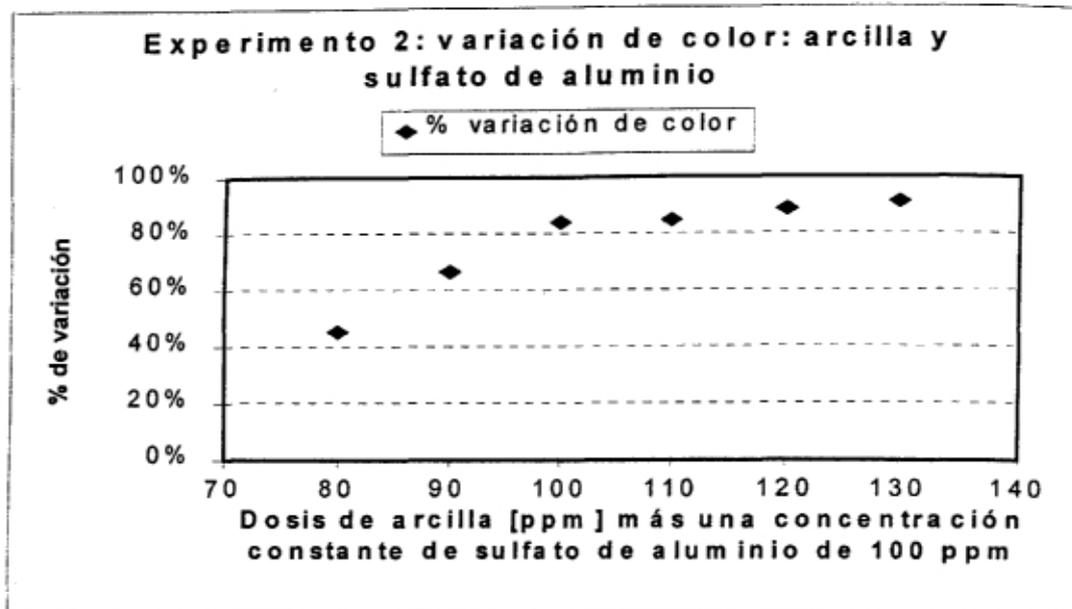


Figura 4.12: variación de color con arcilla decolorante y sulfato de aluminio pH inicial de 7.6

Cuando se utiliza sulfato de aluminio, se observa remoción del orden del 70 a 80% a partir de dosis de 150 ppm. (Figura 4.14). Resultados similares se observan al combinar la arcilla decolorante con el sulfato de aluminio; en este caso se observan remociones del orden del 90% con 100 ppm de arcilla y 100 ppm de sulfato de aluminio. (Figura 4.15). Nuevamente, la explicación de estos resultados se debe al fenómeno de coagulación-floculación que se presenta con el sulfato de aluminio.

La remoción de la DQO en el experimento 2, se presenta en las Figuras 4.16, 4.17 y 4.18. Cuando se utilizó únicamente arcilla decolorante, se observó que la DQO aumentó por el orden del 10% con respecto al valor inicial y permanece más o menos constante conforme aumenta la dosis de arcilla, lo que se refleja en una variación negativa. (Figura 4.16). Cuando se utilizó sulfato de aluminio, se observaron remociones por el orden del 30% a partir de dosis de 100 ppm (Figura 4.17). Resultados similares se obtuvieron al combinar la arcilla decolorante y el sulfato de aluminio. (Figura 4.18)

Es conocido el efecto coagulante del sulfato de aluminio a estos rangos de pH y esto se refleja en el caso de la remoción de color, turbidez y DQO. Al comparar el orden del porcentaje de remoción de color con el de DQO, se puede asumir que las moléculas de color solo forman una pequeña fracción del total de la carga orgánica presente en la muestra de agua residual.

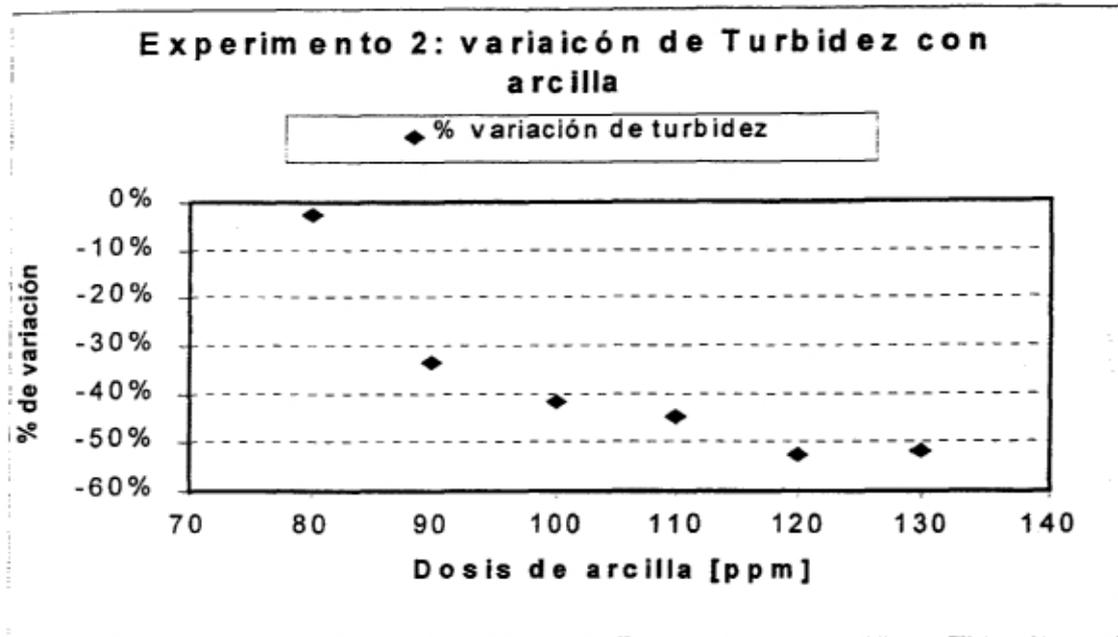


Figura 4.13: variación de turbidez arcilla decolorante a pH inicial de 7.6

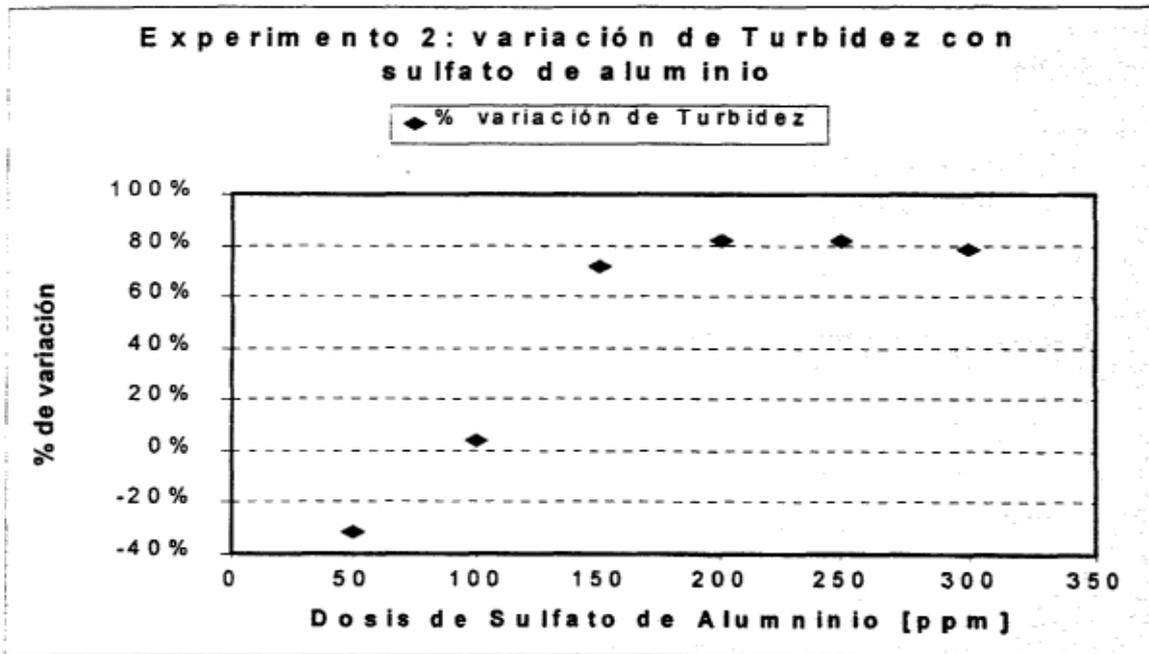


Figura 4.14: variación de color con sulfato de aluminio a pH inicial de 7.6

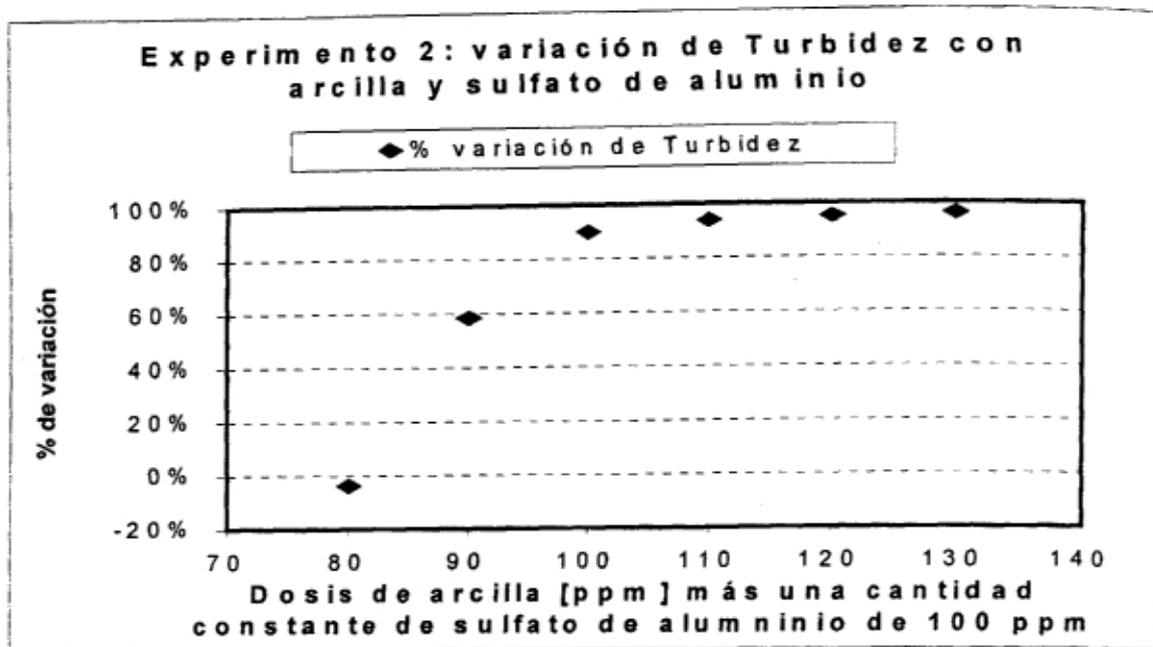


Figura 4.15: variación de turbidez con arcilla decolorante y sulfato de aluminio a pH inicial de 7.6

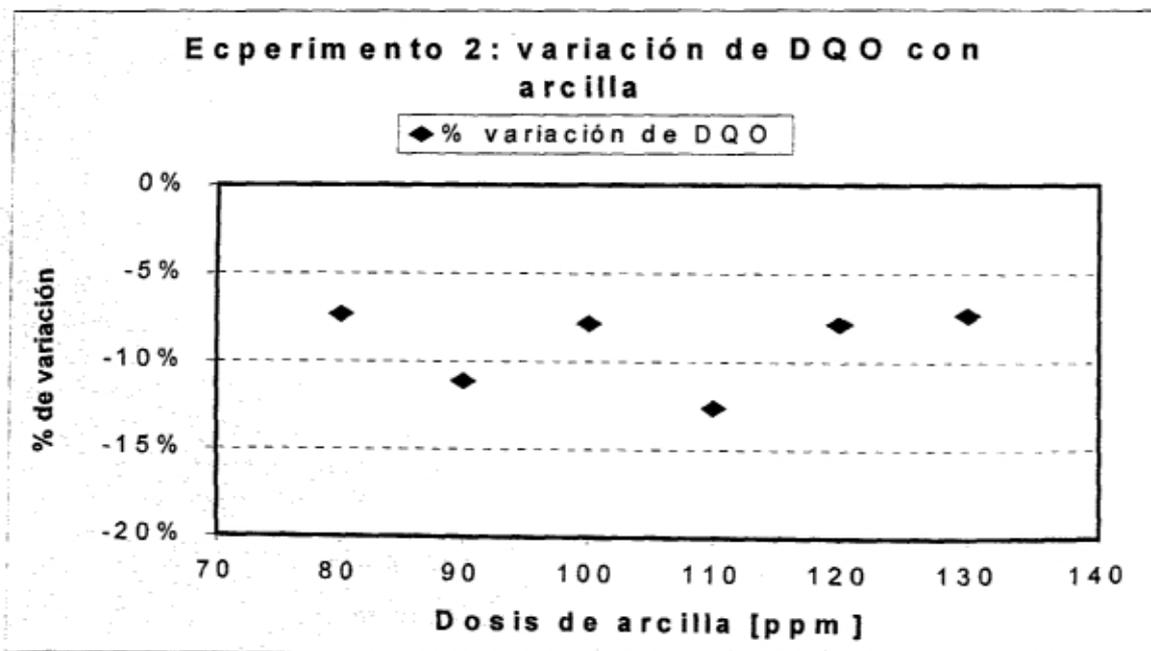


Figura 4.16: variación de DQO con arcilla decolorante a pH inicial de 7.6

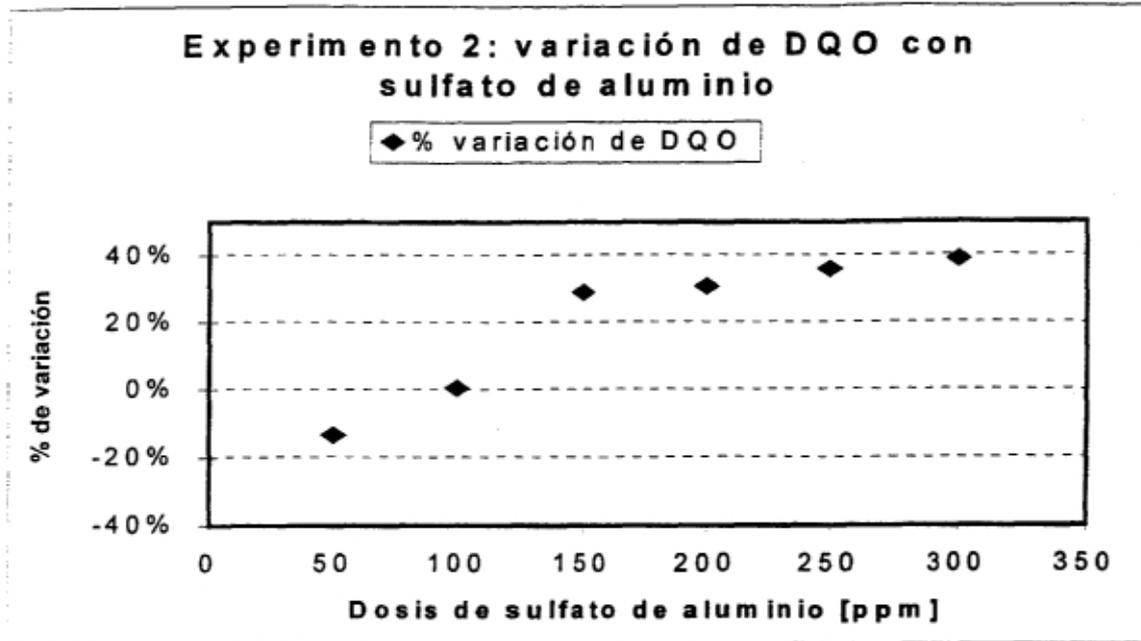


Figura 4.17: variación de DQO con sulfato de aluminio a pH inicial de 7.6

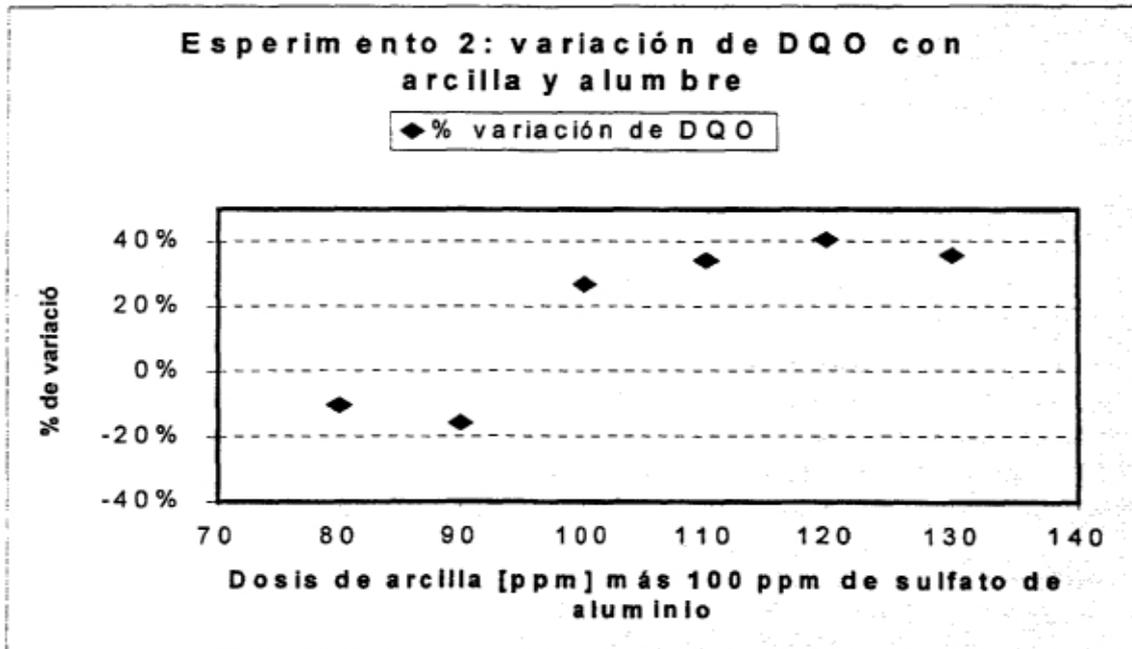


Figura 4.18: variación de DQO con una combinación de arcilla y sulfato de aluminio a pH inicial de 7.6

Al contrastar los resultados obtenidos en el experimento 1 y 2, se puede observar que el pH no es un factor decisivo para la remoción de color, turbidez o pH utilizando únicamente arcilla bentonítica decolorante. El sulfato de aluminio remueve color para pH aproximadamente neutros, en cambio no presenta efecto coagulante a pH ácidos a dosis de 50 a 300 ppm. Este comportamiento ya ha sido estudiado por Amirtharajah y Mills (1982) los cuales obtuvieron condiciones óptimas para el barrido para pH entre 7.7 y 8.0 para dosis de sulfato de aluminio de 14.25 mg/l.

La evidencia presentada los experimentos con arcilla bentonítica a valores de pH ácidos y neutros indica que ésta no presenta acción absorbente. Existen dos posibles razones por las que no se presenta remoción de color:

- a) La molécula de color no tiene carga predominantemente positiva, por lo que no puede existir un intercambio catiónico.
- b) Existen componentes en la muestra que impiden la remoción de color por parte de la arcilla activada debido a que ocasionan un tipo de interferencia entre la molécula de color y la arcilla activada.

En un futuro podría realizarse una metodología experimental para encontrar cual de las posibles razones expuestas anteriormente es la correcta. Utilizar muestras preparadas con colorantes con formulación conocida y con carga positiva, podría ayudar a demostrar el efecto adsorbente de la arcilla. Para entender los cómo interfieren los componentes contenidos en la muestra residual de agua de teñido, se podría adicionar uno a uno cada uno de los aditivos para identificar el posible efecto inhibitorio sobre la adsorción de color en la arcilla, en caso de que este exista.

4.2 Pruebas con Zeolita natural.

Se realizaron pruebas con zeolita natural para evaluar la remoción de color, turbidez y DQO en los efluentes de la industria textil. Inicialmente se realizaron pruebas a dosis pequeñas de zeolita, de 80 a 130 ppm. Se observó que esas concentraciones no presentan efectos significativos de remoción que se puedan explicar únicamente con la zeolita y no al sulfato de aluminio utilizado en las pruebas. Se decidió incrementar la dosis de zeolita a rangos de 20 a 120 g/l con intervalos de 20 y observar el efecto de adsorción sobre el color y DQO.

Experimento 3

El *experimento 3* consiste en utilizar zeolita natural, con una muestra con pH = 7.11. En esta prueba se utilizó una cantidad constante de sulfato de aluminio. Las concentraciones utilizadas de zeolita fueron de 80, 90, 100, 110, 120 y 130 ppm para cada una de las jarras y una concentración constante de 100 ppm de sulfato de aluminio, cuyo propósito es eliminar la turbidez que pudiera ocasionar la zeolita en la muestra. Los resultados se describen a continuación.

En la remoción de color se aprecian remociones del orden de 50 al 60% para las dosis utilizadas de arcilla. Esta remoción es constante para todas las dosis utilizadas de zeolita. (Figuras 4.19, 4.20 y 4.21).

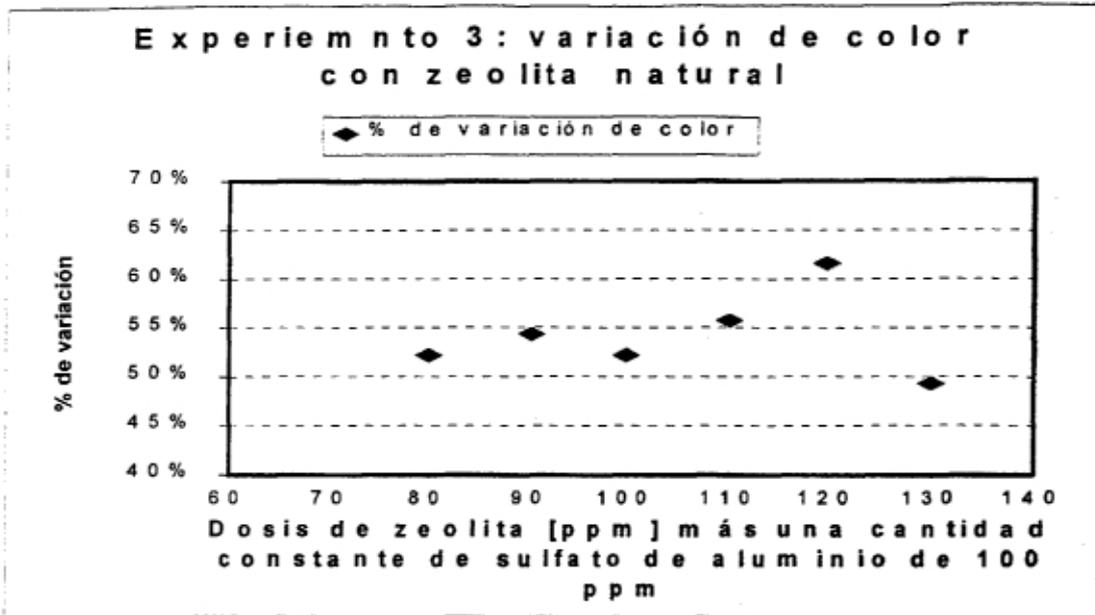


Figura 4.19: variación de color con zeolita natural y sulfato de aluminio a pH inicial de 7.11

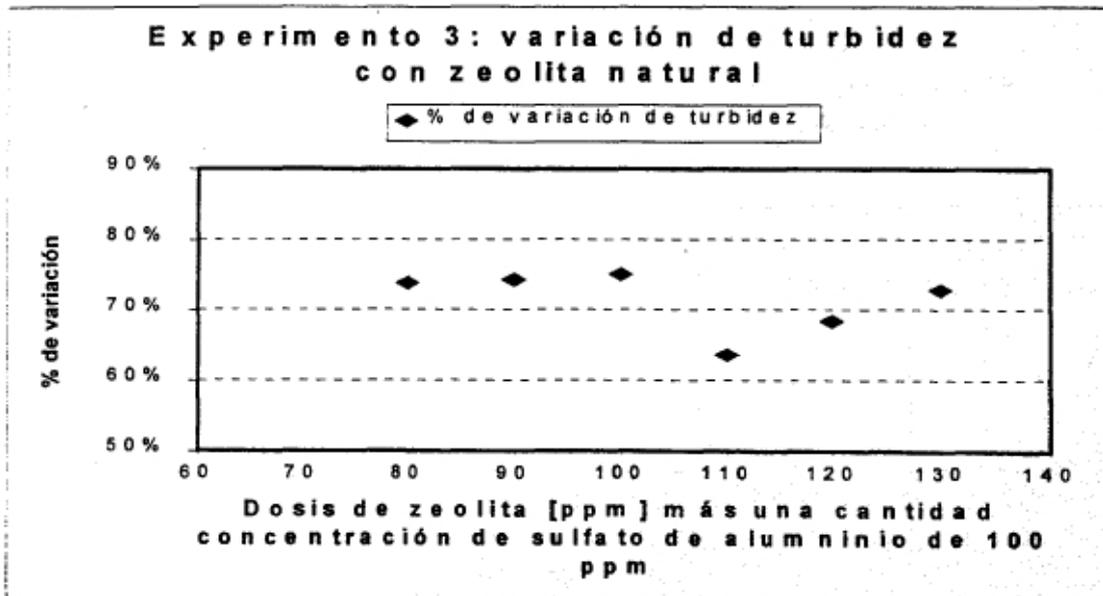


Figura 4.20: variación de turbidez con zeolita natural y sulfato de aluminio a pH inicial de 7.11

La remoción permanece constante debido al sulfato de aluminio utilizado, que a pH de 7 provoca la coagulación-floculación y la consecuente remoción de color. Dado que la dosis de sulfato de aluminio es constante e igual a 100 ppm, los porcentajes de variación permanecen constantes. Este resultado evidenció que la zeolita natural no adsorbe color dado que al incrementar su concentración, debería aumentar la remoción de color, la cual permanece constante.

Se observó una remoción de turbidez del orden de 65 a 70 % con un comportamiento constante para todas las dosis de zeolita utilizadas. (Figura 4.20).

En la remoción de DQO, se observa un comportamiento similar a excepción de un punto que se sale del comportamiento, probablemente debido a un error en la medición. Las remociones de DQO son del orden del 10 al 20%. (Figura 4.21)

Con base en el comportamiento de las Figuras 4.20, 4.21 y 4.22 se puede inferir que la remoción de los parámetros es aproximadamente constante para las diferentes dosis de zeolita utilizadas y que los porcentajes de variación se deben al sulfato de aluminio que a estos valores de pH presentan mecanismos de coagulación. La concentración constante de 100 mg/l ocasiona que la remoción sea constante. La Figura 4.11 mostrada anteriormente, representa la remoción de color con sulfato de aluminio para rango de pH aproximadamente neutro. Estos resultados muestran que el sulfato de aluminio es capaz, por si solo de remover color, tal como se presenta en el experimento 3.

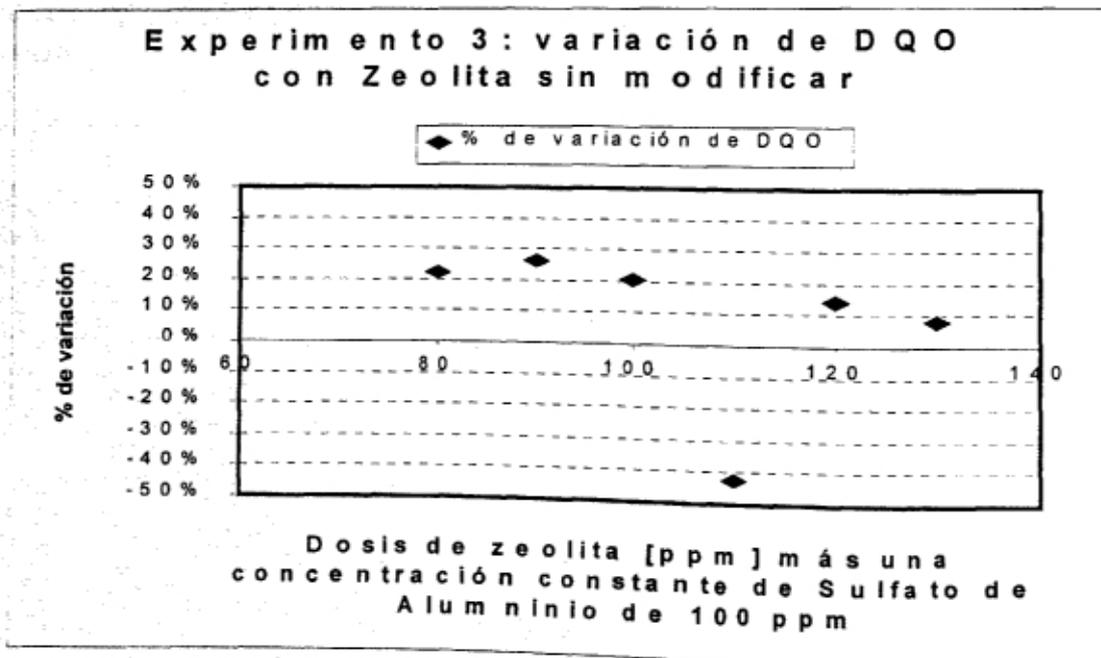


Figura 4.21: variación de DQO con zeolita natural y sulfato de aluminio. pH inicial de 7.11

En conclusión, la remoción observada de los diferentes parámetros en este experimento se debe al sulfato de aluminio y no a la zeolita natural, por lo menos no a las dosis utilizadas.

Se realizó un experimento, con la misma muestra a pH inicial de 7.11 y se midió el efecto de la remoción de color sin utilizar sulfato de aluminio. El resultado fue una remoción de color casi nula y constante para la variación de la dosis de zeolita natural, lo que confirma que la zeolita, a este nivel de pH y a estas concentraciones, no presenta efectos de intercambio catiónico. Los resultados de experimento se pueden observar en la Figura 4.22.

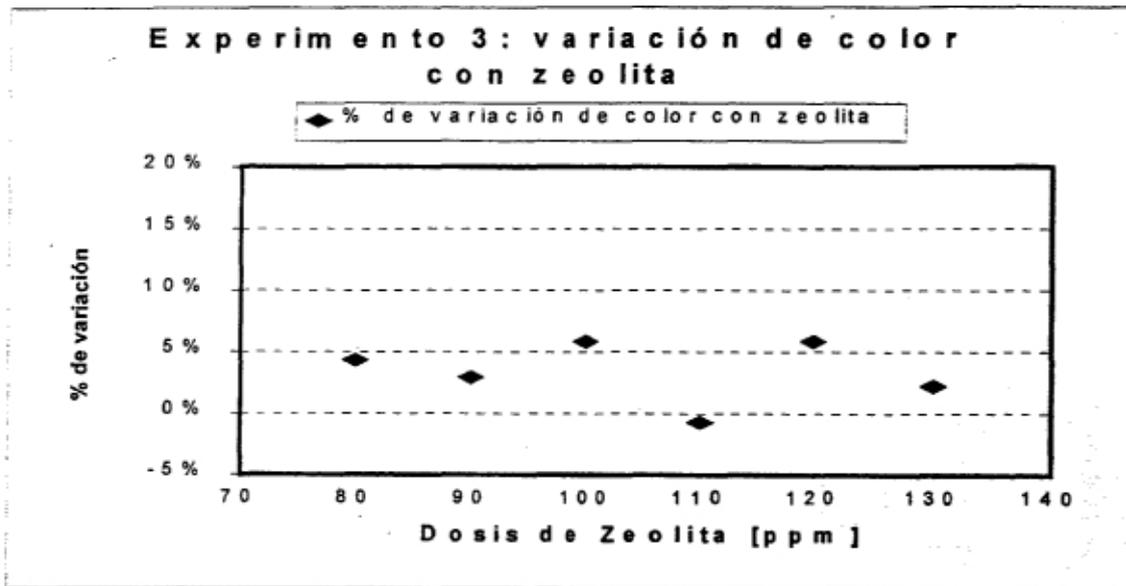


Figura 4.22: variación de color con zeolita natural a pH inicial de 7.11

El experimento 3, da la pauta para planear dos experimentos más: el primero donde se aumente la dosis de zeolita para ver el efecto de adsorción del color, y el segundo es eliminar el sulfato de aluminio para diferenciar el efecto de la zeolita del coagulante.

Experimento 4

Se repitió la metodología empleada en el *experimento 3*, con una muestra de pH = 7.72, solo que se aumentó la concentración de zeolita al no observar efecto de remoción con las concentraciones empleadas en el experimento 3. Las concentraciones utilizadas de zeolita fueron de 20, 40, 60, 80, 100 y 120 g/l (sin utilizar sulfato de aluminio) obteniéndose los siguientes resultados.

En el caso del color, no se presenta remoción, sino al contrario, se observa un incremento en las unidades de color, lo que se refleja en un porcentaje de

remoción negativo (Figura 4.23). Este resultado puede deberse a que la molécula de color no presenta carga positiva y no puede ser adsorbida por la zeolita natural.

No se observa remoción en turbidez, sino al contrario, los valores de turbidez aumentan casi al doble para concentraciones de 120 g/l de zeolita natural. (Figura 4.24)

En el caso del parámetro de la DQO, se observa una remoción del orden del 20 al 30% con respecto a la concentración inicial (Figura 4.25). Esto indica que la zeolita es capaz de adsorber algún componente de la muestra, pero no necesariamente color, como lo demuestra la Figura 4.23.

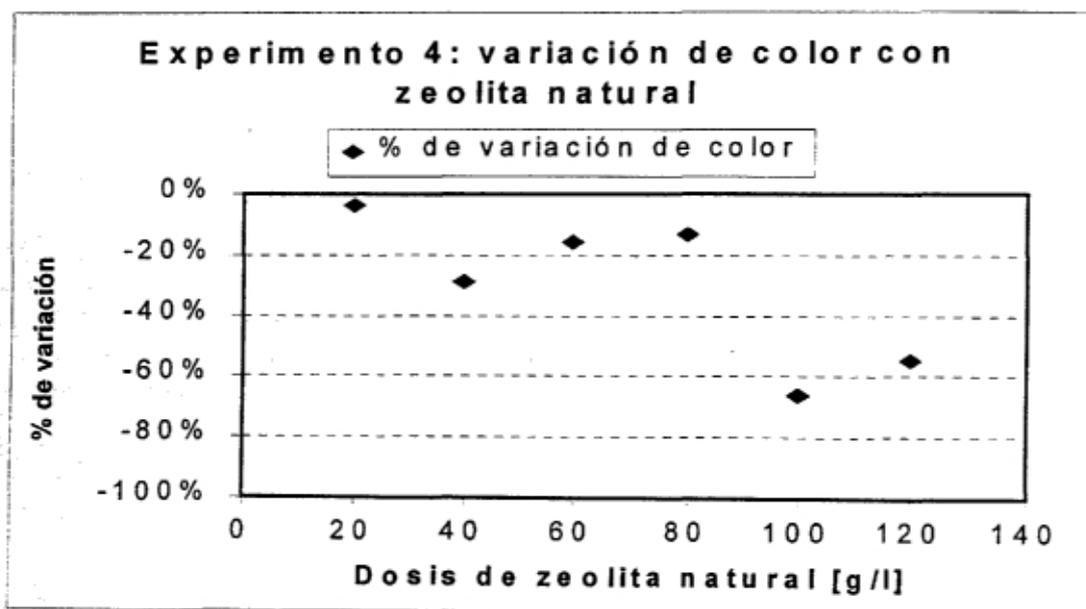


Figura 4.23: variación de color con zeolita natural a pH inicial de 7.72

Hay que recordar que el lote de muestra utilizado en este experimento es diferente al utilizado en el experimento 3. Los resultados indican que la zeolita natural no adsorbe color, pero si otro tipo de componentes dado que los niveles de DQO disminuyen con respecto a los valores iniciales como se muestra en la Figura 4.25.

Lo anterior es indicio de que al colorante utilizado en este lote no posee carga positiva y por lo tanto no puede realizar el intercambio catiónico con la zeolita natural.

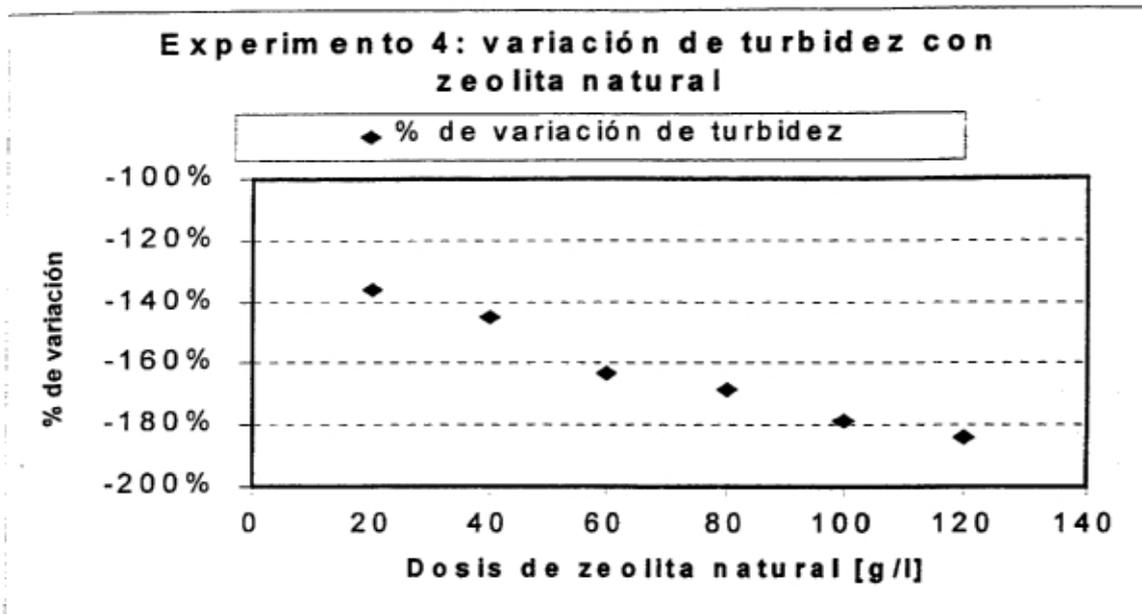


Figura 4.24: variación de turbidez con zeolita natural a pH inicial de 7.72

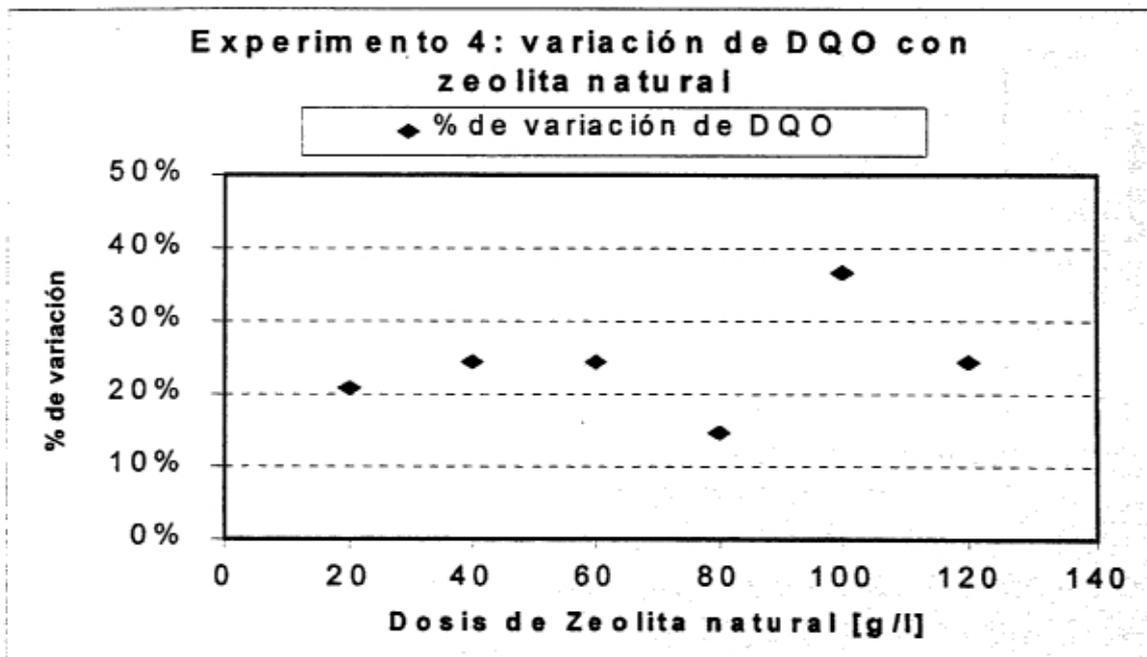


Figura 4.25 : variación de DQO con zeolita natural a pH inicial de 7.72

Experimento 5

El *experimento 5* consistió en utilizar dosis de zeolita combinada con dosis constante de sulfato de aluminio e igual a 100 ppm. Se realizó una prueba con una muestra de pH inicial de 11.55 y las concentraciones de zeolita utilizadas en el experimento son de 20, 40, 60, 80, 100 y 120 g/l. Se decidió aumentar la dosis de zeolita natural a estas concentraciones para diferenciar el efecto de absorción de la zeolita con respecto a la remoción producida por el sulfato de aluminio.

Las gráficas muestran un comportamiento constante en los niveles de remoción podría llegar a indicar que la remoción de los parámetros a medir es ocasionada por el sulfato de aluminio, pero a este valor de pH se necesitan dosis elevadas del sulfato de aluminio, del orden de 3000 ppm y se observa remoción a niveles muy pequeños coagulante, del orden de 50 y 100 ppm. Por lo anterior expuesto se puede asumir que la zeolita contribuye a la remoción de color, turbidez y DQO en la muestra analizada y para pH básicos.

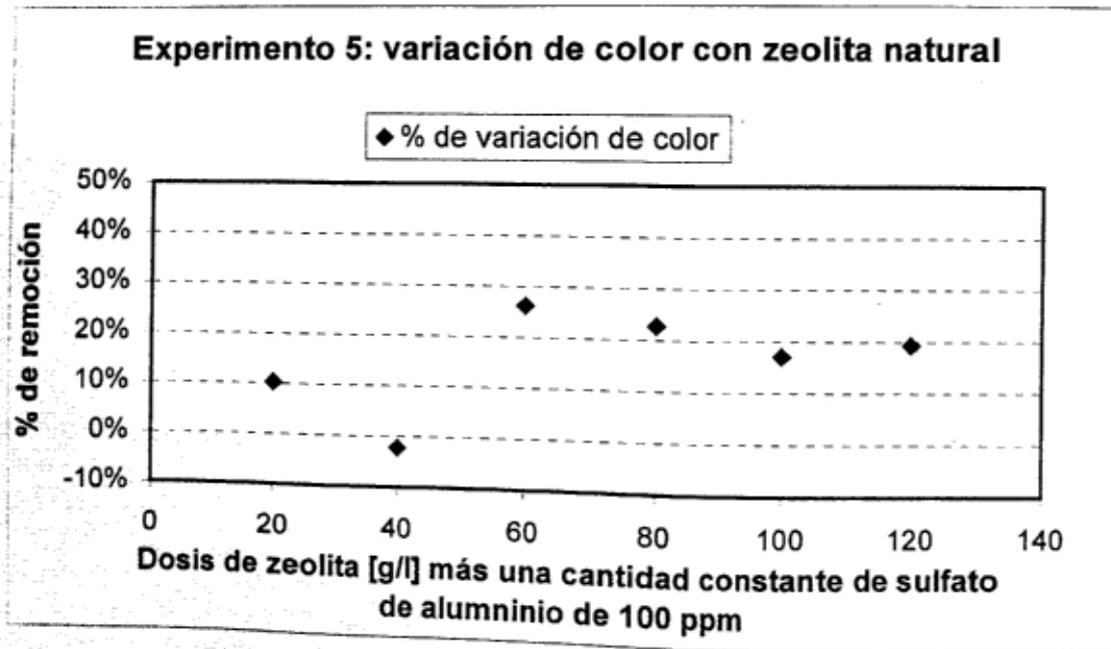


Figura 4.26: variación de color con zeolita natural y sulfato de aluminio a pH inicial de 11.55.

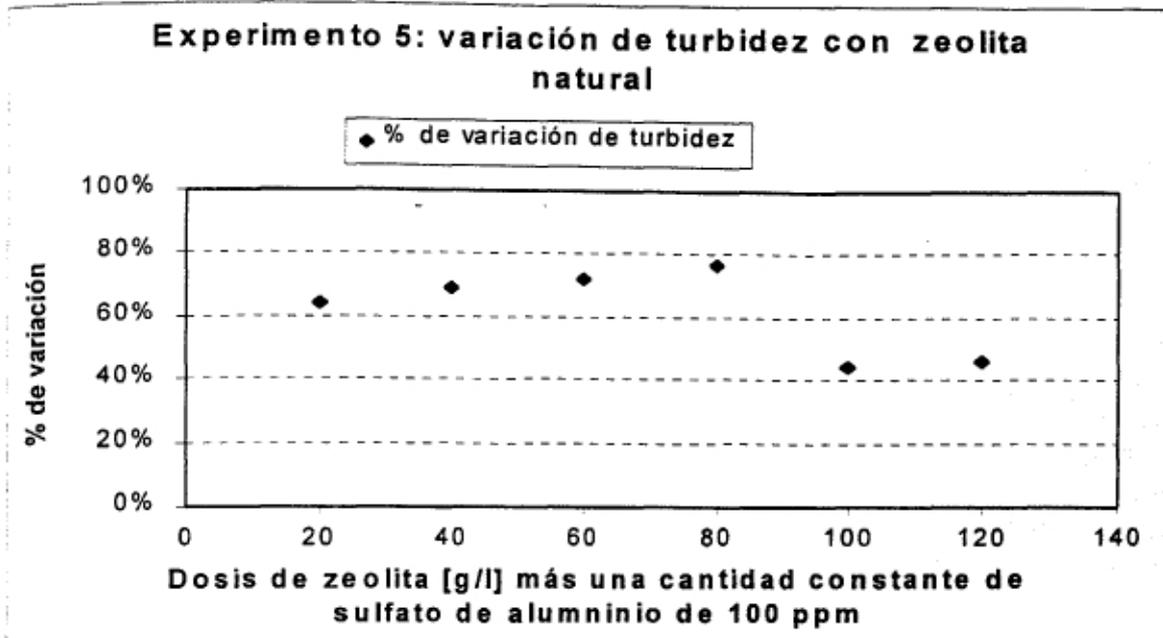


Figura 4.27: variación de turbidez con zeolita natural y sulfato de aluminio a pH inicial de 11.55.

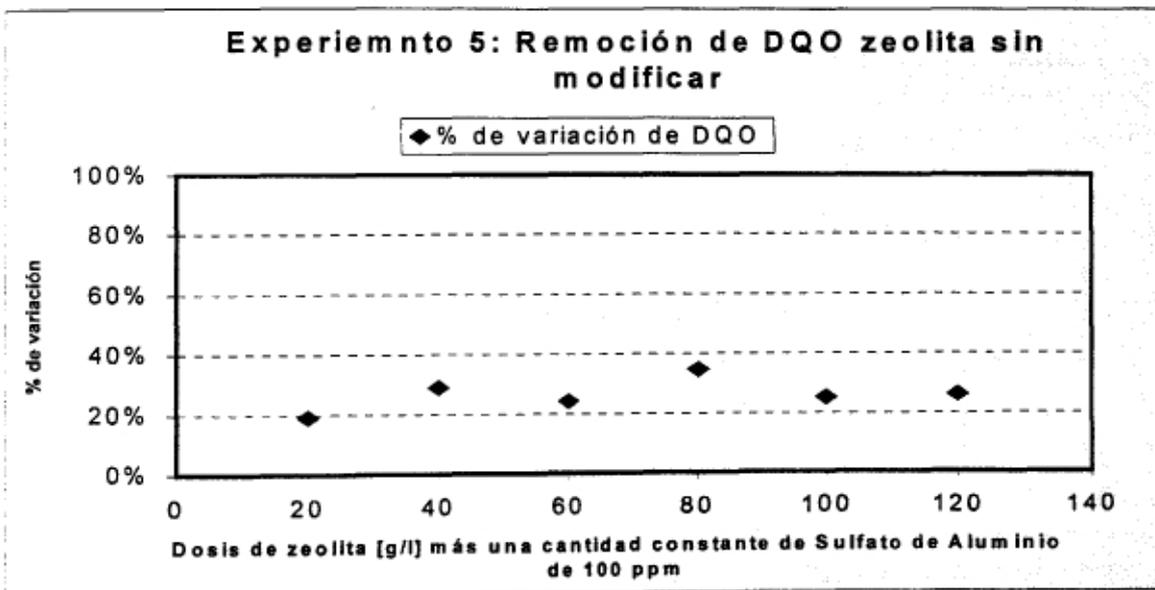


Figura 4.28: variación de DQO con zeolita natural y sulfato de aluminio a pH inicial de 11.55.

Experimento 6

En el *experimento 6*, se realizó la misma metodología empleada para el *experimento 4*, solamente se varió el pH de la muestra, que en este caso es ácido (pH = 2.47). Puede considerarse como una extensión del *experimento 3*, solo que se aumentaron la dosis a 20, 40, 60, 80, 100 y 120 g/l. Los resultados se explican a continuación.

En la remoción de color se observa un incremento en los porcentajes de remoción, conforme se aumenta la dosis de arcilla. Los porcentajes de remoción de color, varían de 20 al 60%. Debido a que la concentración de sulfato de aluminio es constante se infiere que el incremento observado en los porcentajes de remoción se debe a la absorción de las moléculas de color por la zeolita. El sulfato de aluminio para estos valores de pH se presenta en especies solubles y tiene poca acción coagulante.

En el caso de la turbidez, se observa un aumento en la remoción de la misma, al aumentar las dosis de zeolita. Esto era de esperarse ya que se esta incrementando la concentración de partículas coloidales al adicionar la zeolita y el Sulfato de aluminio a estos valores de pH no presenta efecto coagulante como se mencionó anteriormente.

Las últimas dos jarras tienen valores de turbidez cercanos a la muestra original. También se midió la remoción de DQO, obteniéndose remociones del orden de 30 a 40% para dosis de zeolita de 40 a 120 g/l. (Figura 4.31).

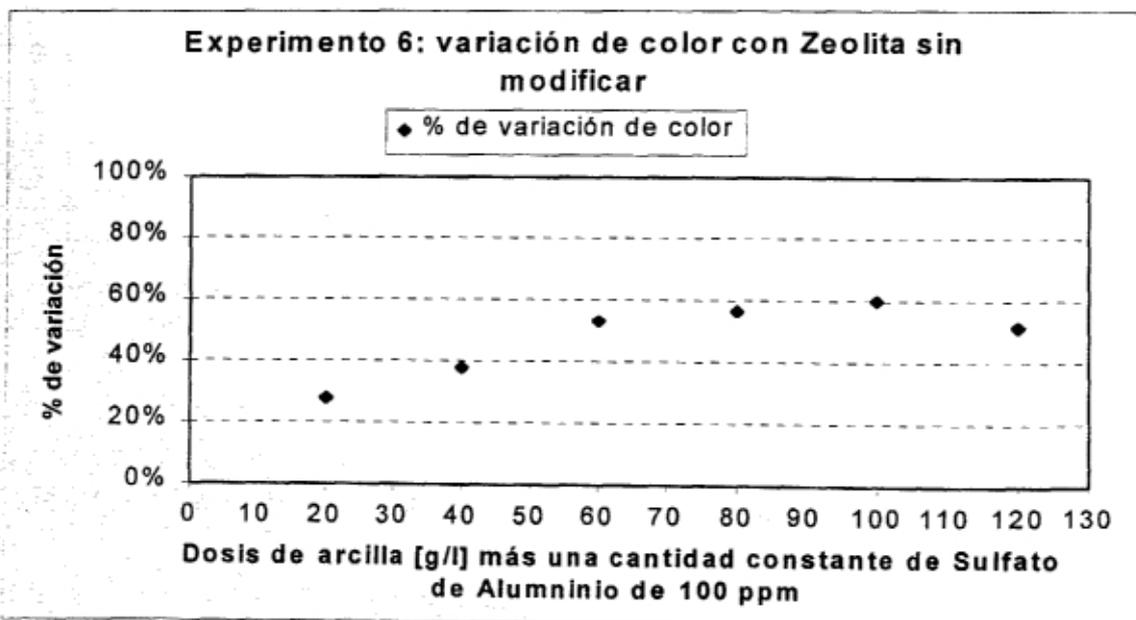


Figura 4.29: variación de color con zeolita natural y sulfato de aluminio a pH inicial de 2.47.

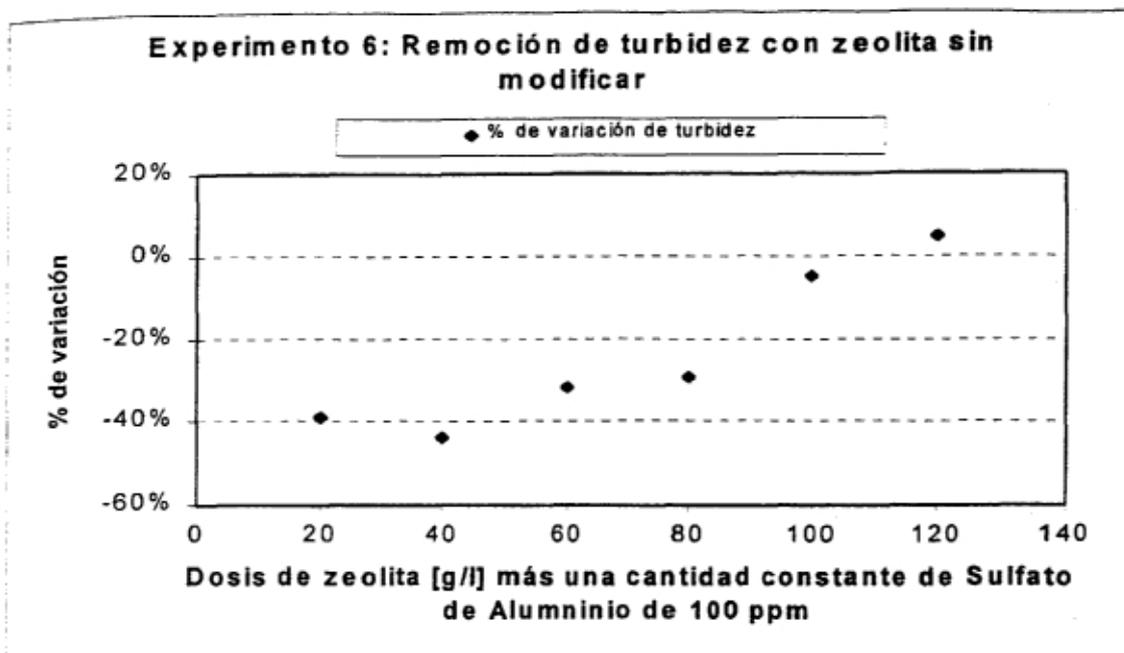


Figura 4.30: variación de turbidez con zeolita natural y sulfato de aluminio a pH inicial de 2.47.

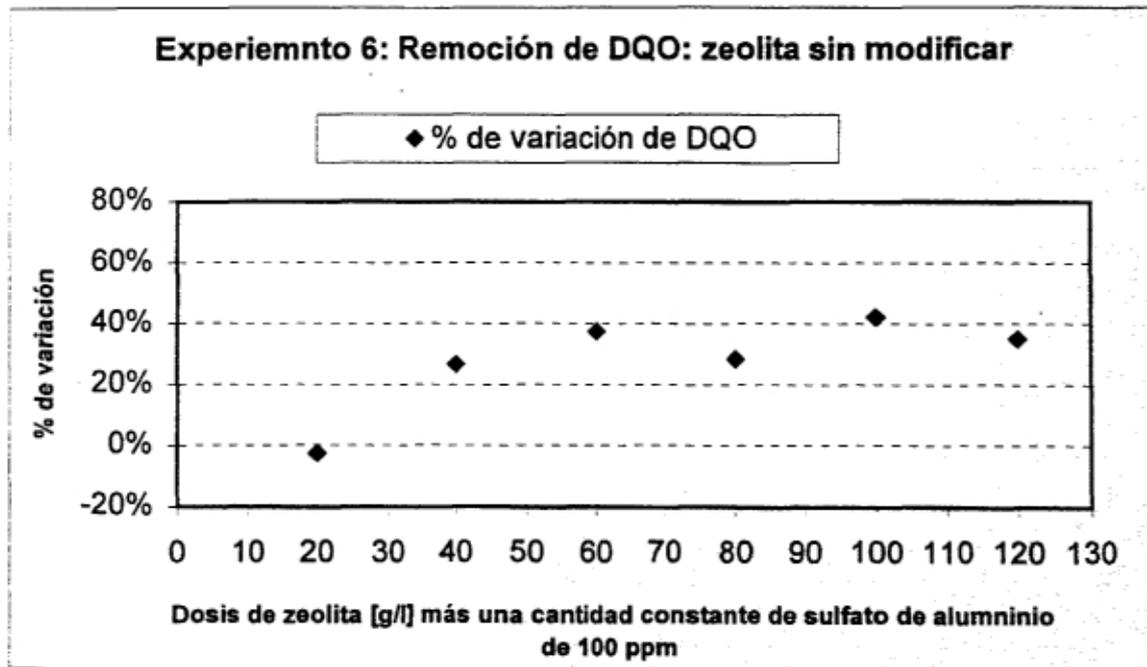


Figura 4.31: variación de DQO con zeolita natural y sulfato de aluminio a pH inicial de 2.47.

Los niveles de DQO están relacionados con la presencia de las moléculas de color y a los diferentes aditivos que se utilizan en el proceso de teñido. Al presentarse una remoción de las moléculas de color, se observa disminución en los niveles de DQO, tal como se aprecia en la Figura 4.31.

Experimento 7

Se realizó la misma prueba que el experimento 6 a pH = 10.35, solo que ahora sólo se utilizó zeolita natural sin el sulfato de aluminio.

No hubo remoción de color con la zeolita natural como se aprecia en la Figura 4.32. Los valores de turbidez aumentaron por arriba del doble de su valor original (Figura 4.33), pero los valores de DQO disminuyeron hasta un 30 % aproximadamente (Figura 4.34).

Los resultados obtenidos en este experimento indican que la zeolita natural tiene capacidad de adsorber cierto tipo de componentes contenidos en la muestra, pero no necesariamente moléculas de color, ya que este parámetro permanece aproximadamente contante.

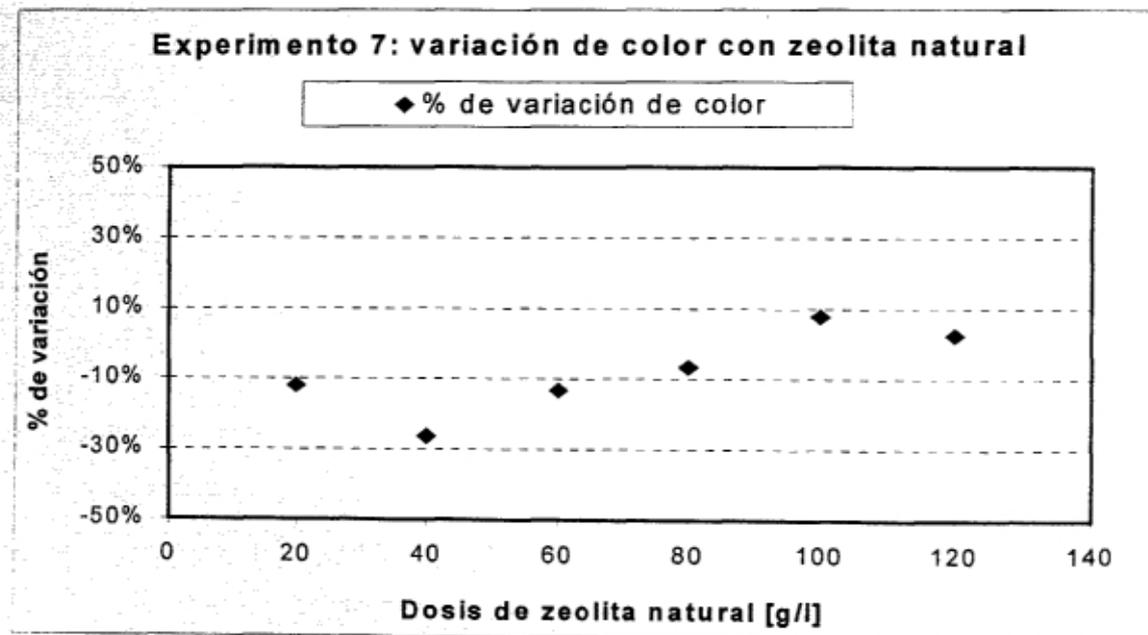


Figura 4.32: variación de color con zeolita natural a pH inicial de 10.35.

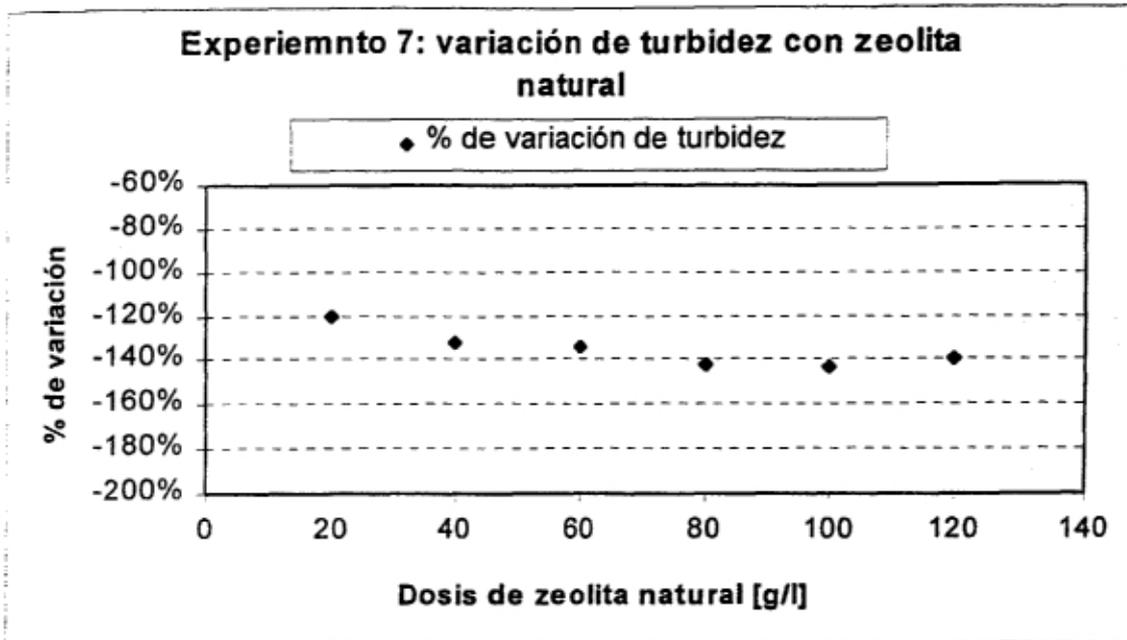


Figura 4.33: variación de turbidez con zeolita natural a pH inicial de 10.35.

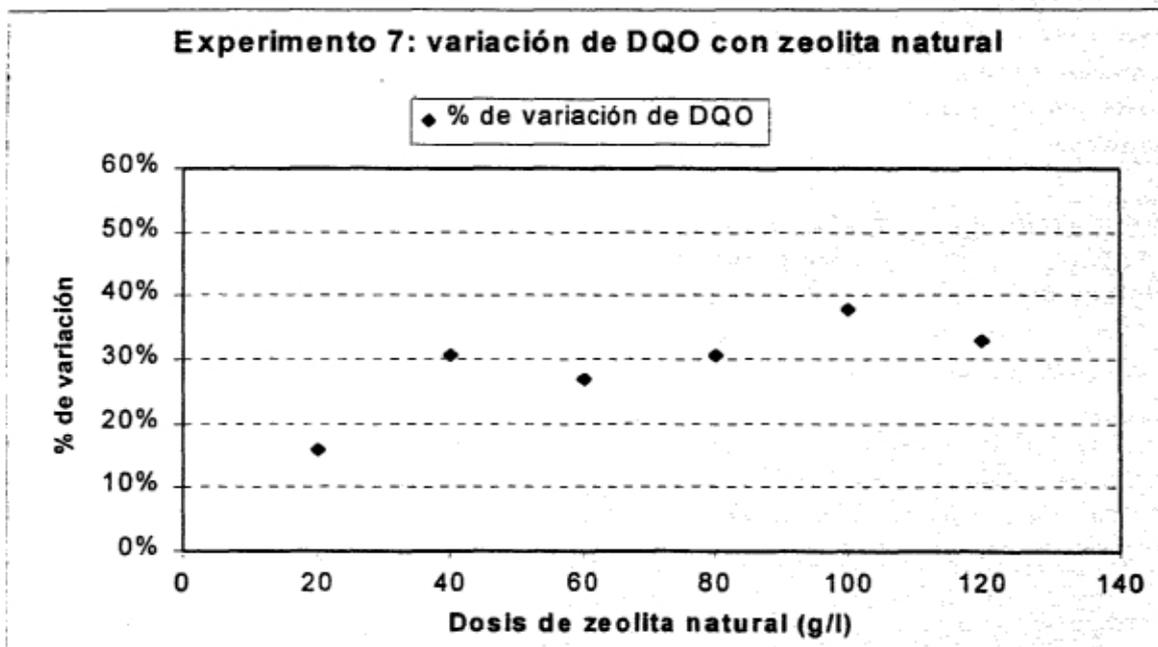


Figura 4.34: variación de DQO con zeolita natural a pH inicial de 10.35.

De los *experimentos 3, 4, 5, 6 y 7* se desprenden las siguientes observaciones.

1. La zeolita natural no tiene efecto adsorbente sobre el color en concentraciones por el orden de 80 a 130 partes por millón.

2. El pH no es un factor decisivo para la adsorción de color, ya que para valores ácidos y básicos de pH se observa cierto grado de remoción de color (experimento 5 y 6). Hay que recordar que las muestras fueron obtenidas de lotes diferentes y que los colorantes utilizados pueden ser diferentes en formulación y propiedades.
3. La muestra contiene una serie de componentes que pueden ocasionar en un momento dado, interferencia en el proceso de adsorción tal como resultó en el experimento 4.

Se asume que uno de los motivos por los que no se observa remoción de color es porque el colorante no tiene carga positiva. Una forma de corroborar los resultados obtenidos en los experimentos 3, 4 y 5 es modificando la zeolita con cloruro de cetilpiridinio. De esta forma se invierte la carga de la zeolita para tener un intercambio aniónico en lugar de un intercambio catiónico.

4.3 Pruebas con zeolita modificada con cloruro de cetilpiridinio.

El cloruro de cetilpiridinio es un agente modificante que contiene una carga positiva debida a un Nitrógeno trivalente presente en el grupo piridín. Dicha carga positiva neutraliza las cargas negativas de la zeolita natural y por la naturaleza del ion cetilpiridinio que se encuentra en exceso, actúan las fuerzas de Van de Waals en el polímero ocasionando que las cadenas de carbono de los iones libres se unan a las cadenas de carbono de los iones unidos a la zeolita, provocando una inversión de la carga de la zeolita a carga positiva. Debido a esta característica, la zeolita modificada con este compuesto químico es capaz de intercambiar iones negativos.

Para investigar la naturaleza de la carga eléctrica de las moléculas de colorante presentes en las muestras provenientes de la industria textil, se realizaron pruebas con una muestra con pH = 7.58. y pH= 10.15. Se repitió la misma prueba, ahora con pH = 3.39 y pH= 9.17. En dichas pruebas no se utilizó sulfato de aluminio como ayuda de coagulación.

Los resultados obtenidos no proporcionan evidencia de la remoción de color por la zeolita modificada químicamente. Es necesario variar algunos parámetros para obtener más información sobre el comportamiento de adsorción de la zeolita modificada, en caso de haberlo.

Experimento 8

En el experimento 8 se utilizaron dosis de zeolita modificada de 20 a 120 g/l con incrementos de 20 g/l utilizando una muestra con pH inicial de 7.58. Para dosis de 20 g/l de zeolita modificada se observó una remoción del orden del 34 %, esta remoción fue disminuyendo conforme aumentaba la concentración de zeolita hasta alcanzar valores de remoción negativa en las últimas dos jarras (incremento del color de orden del 5 %). (Figura 4.35)

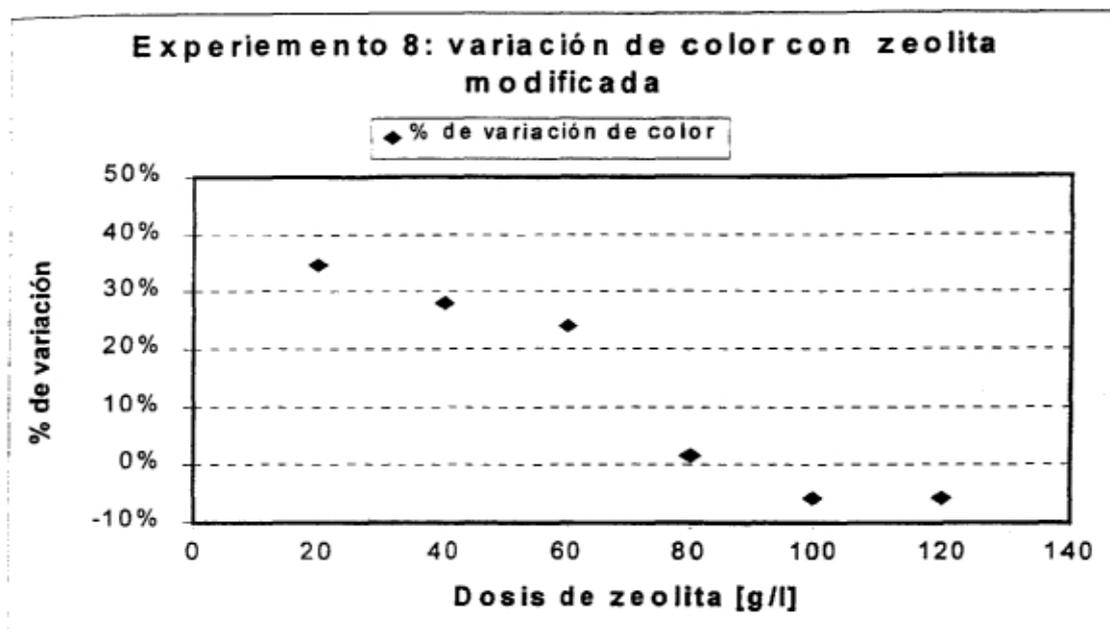


Figura 4.35: variación de color con zeolita modificada a pH inicial de 7.58.

La remoción de turbidez tuvo un comportamiento similar a la remoción de color con zeolita modificada. Para dosis de 20 g/l se observó una remoción del orden del 33% la cual fue disminuyendo conforme aumentaba la concentración de zeolita modificada, hasta llegar a niveles de remoción de 15 % en promedio para dosis de 100 y 120 g/l. (Figura 4.36)

En la medición de la remoción de DQO. No se observaron valores significativos de remoción como se puede apreciar en la Figura 4.37. La máxima remoción observada fue del orden del 7% para una dosis de 8 g/l. El comportamiento de la gráfica es casi lineal sobre el valor de remoción de 0%.

Con los resultados obtenidos no se tienen elementos para afirmar que la zeolita modificada tiene capacidad adsorbente. Es necesario variar parámetros como el pH para ver el efecto en la adsorción. También es necesario repetir la prueba con otra muestra para ver el efecto de la composición en la adsorción del color.

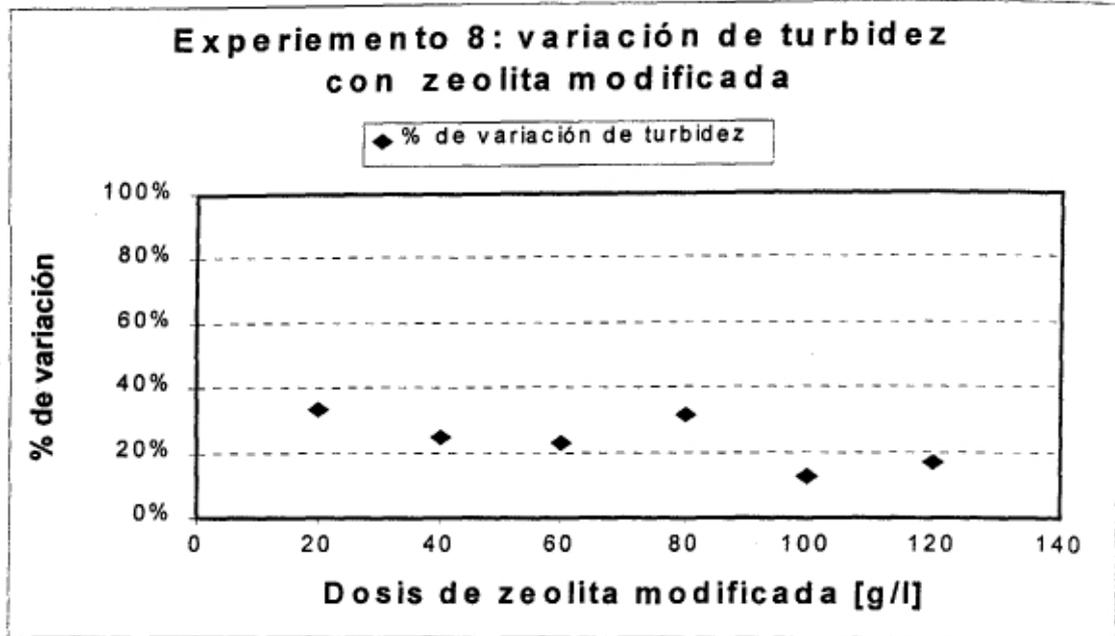


Figura 4.36: variación turbidez con zeolita modificada a pH inicial 7.58

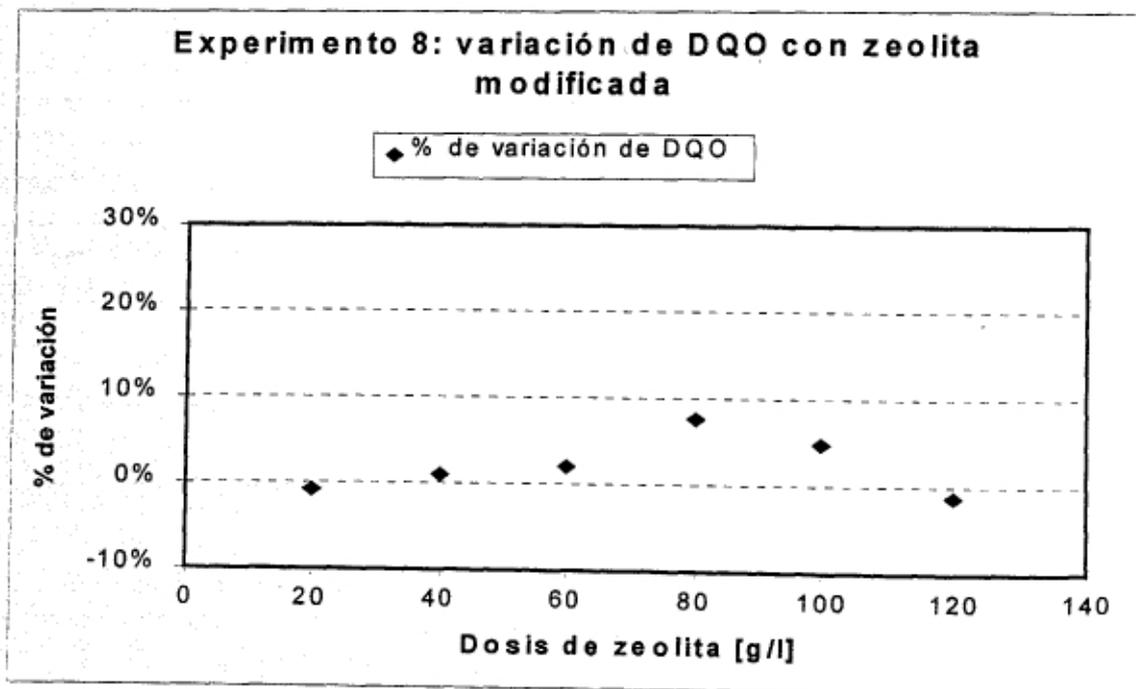


Figura 4.37: variación de DQO con zeolita modificada a pH inicial de 7.58

Experimento 9

Se repitieron las condiciones del experimento 8, sólo que ahora se varió el pH de la muestra a rangos básicos de 10.15.

Para esta prueba, el color obtenido después de adicionar la zeolita modificada con cloruro de cetilpiridinio, se pasó de los límites detectados por el espectrofotómetro, para la prueba de Pt - Co. Se midió solo la remoción de turbidez y la remoción de DQO.

Una posible razón del aumento de los niveles de color a valores de pH básicos es que la molécula de color sufrió modificaciones debido al pH y aumentó la concentración de color en la muestra, ya que se trataba de la misma muestra del experimento 8.

En el caso de la turbidez se observa un incremento de la misma conforme se aumenta la dosis de zeolita modificada. Dichos incrementos alcanzan valores hasta del 270% para dosis de zeolita de 60 g/l. Figura 4.38 Este comportamiento era esperado, ya que la zeolita modificada incrementa los niveles de turbidez en la muestra de agua coloreada.

En el caso de la DQO no se observan niveles de remoción, ya que el comportamiento del porcentaje de remoción con respecto a la concentración de zeolita modificada permanece aproximadamente contante, como se puede apreciar en la Figura 4.39. Al no existir remoción de componentes por parte de la zeolita modificada, los valores de la DQO en la muestra permaneces constantes.

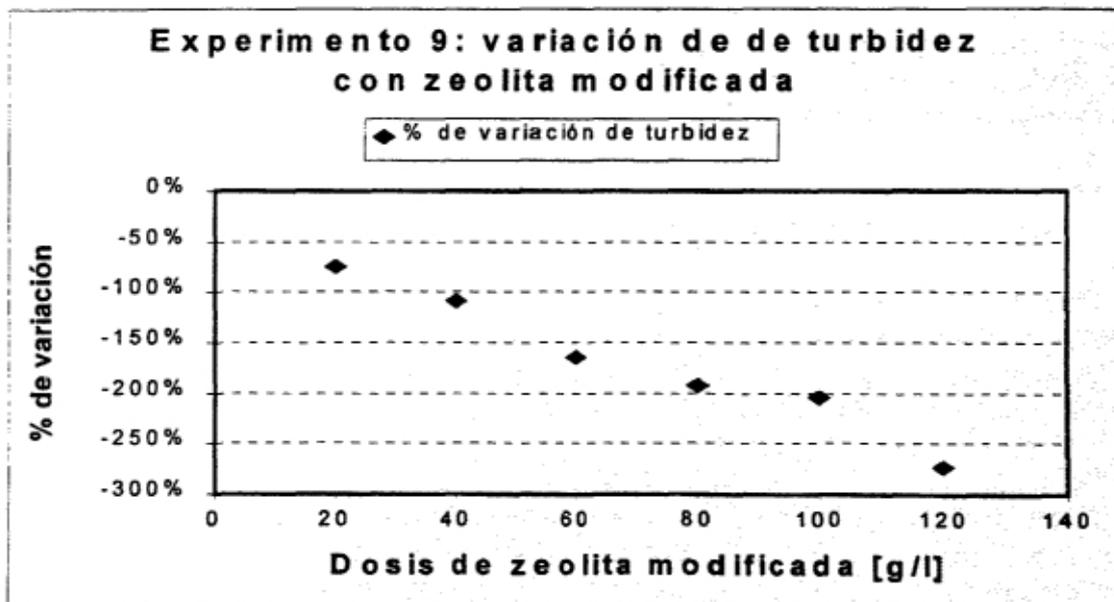


Figura 4.38: variación de turbidez con zeolita modificada. pH inicial de 10.15.

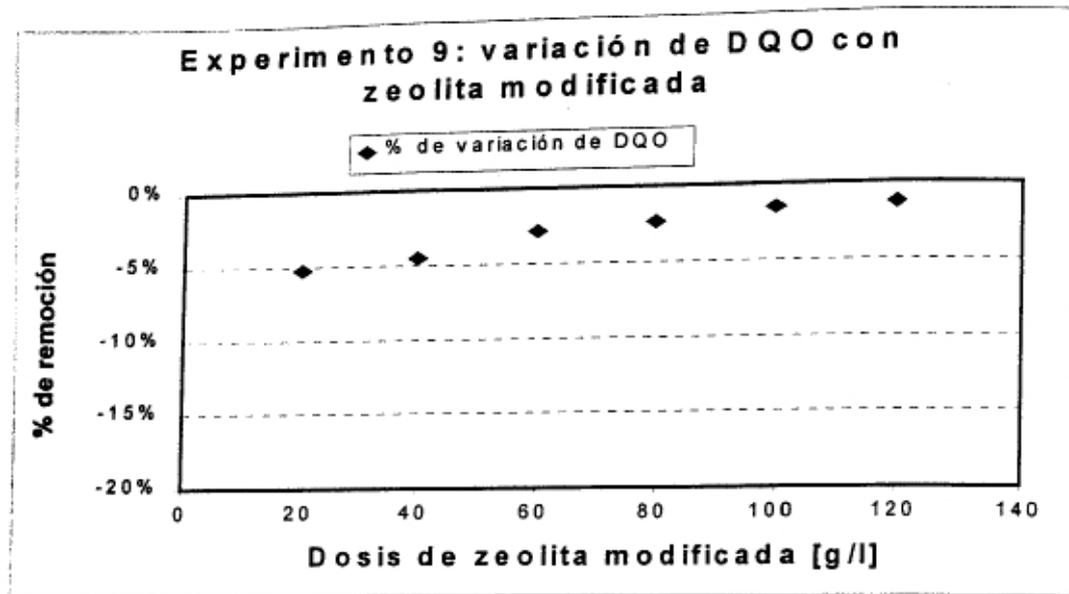


Figura 4.39: variación de DQO con zeolita modificada a pH inicial de 10.15.

Experimento 10

Se repitieron los experimentos 8 y 9 pero con otra muestra obtenida de otro lote de **teñido**. Las características de las muestras son diferentes y se modificó el pH para llevarlo a un valor inicial de 3.39.

Para el caso de color, se observan valores de remoción del orden del 11% al 25%. Este intervalo de valores se mantiene para las diferentes dosis de zeolita modificada utilizadas. (Figura 4.40).

No se observa remoción de turbidez. En cambio se observan pequeños incrementos en la turbidez, del orden del 10% y 15% para las dosis de 10 y 20 g/l.

En general el comportamiento de los puntos se apega a la línea del 0% de variación. (Figura 4.41). No se observa remoción apreciable de la DQO. Los puntos graficados de concentración de zeolita modificada contra el porcentaje de remoción permanecen cercanos al valor de 0% de variación para las diferentes dosis. (Figura 4.42)

La remoción de color indica que la zeolita modificada tiene un efecto adsorbente sobre los elementos que ocasionan color a la muestra pero no ocasiona cambios significativos en la variación de DQO. Analizando la proporción de componentes para el **teñido** observamos que el orden de magnitud de los componentes agregados durante el proceso puede ser hasta de 13 veces la cantidad de colorante empleado, por lo que es de esperarse que el color no represente un gran porcentaje en el contenido total de la DQO.

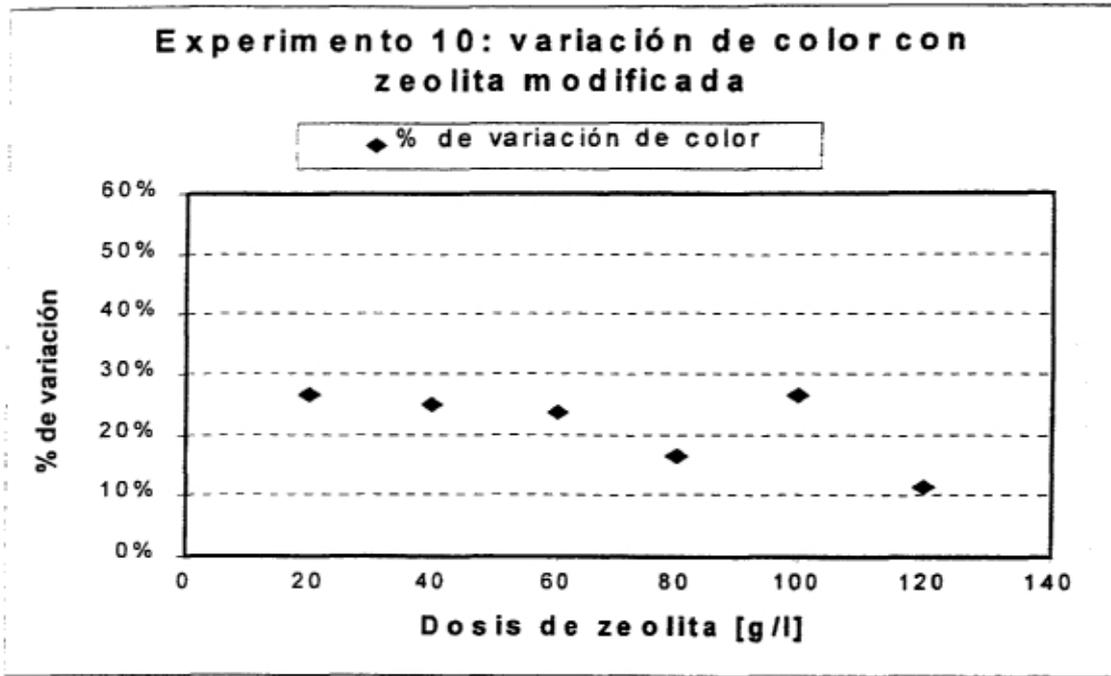


Figura 4.40: variación de color con zeolita modificada a pH inicial de 3.39

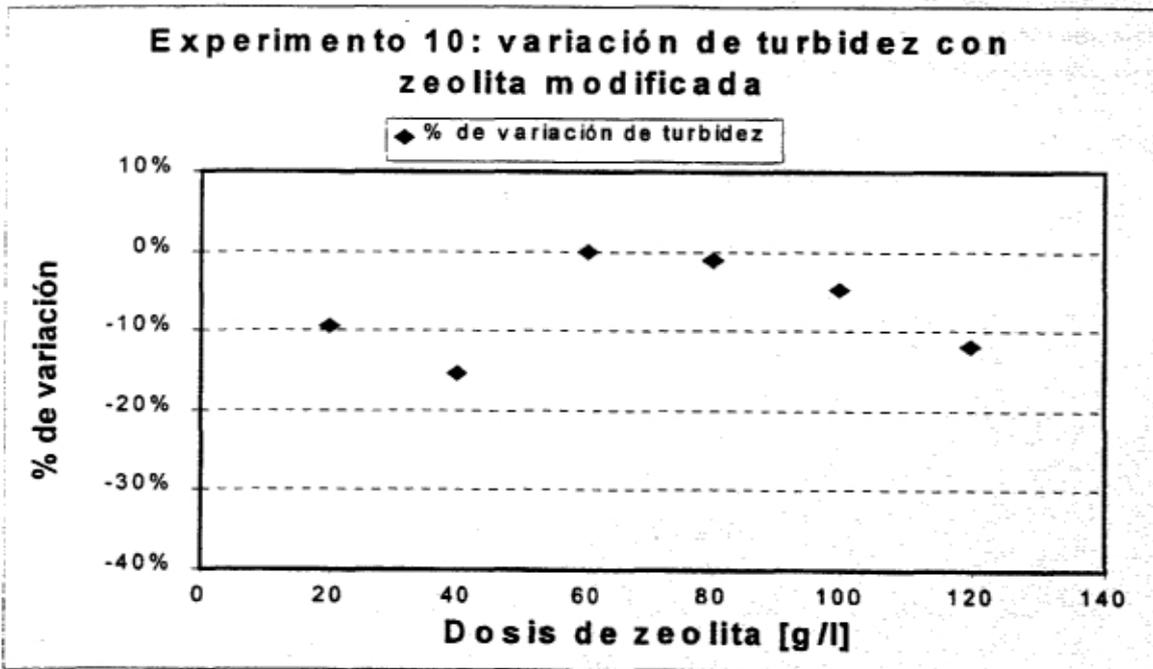


Figura 4.41: variación de turbidez con zeolita modificada a pH inicial de 3.39.

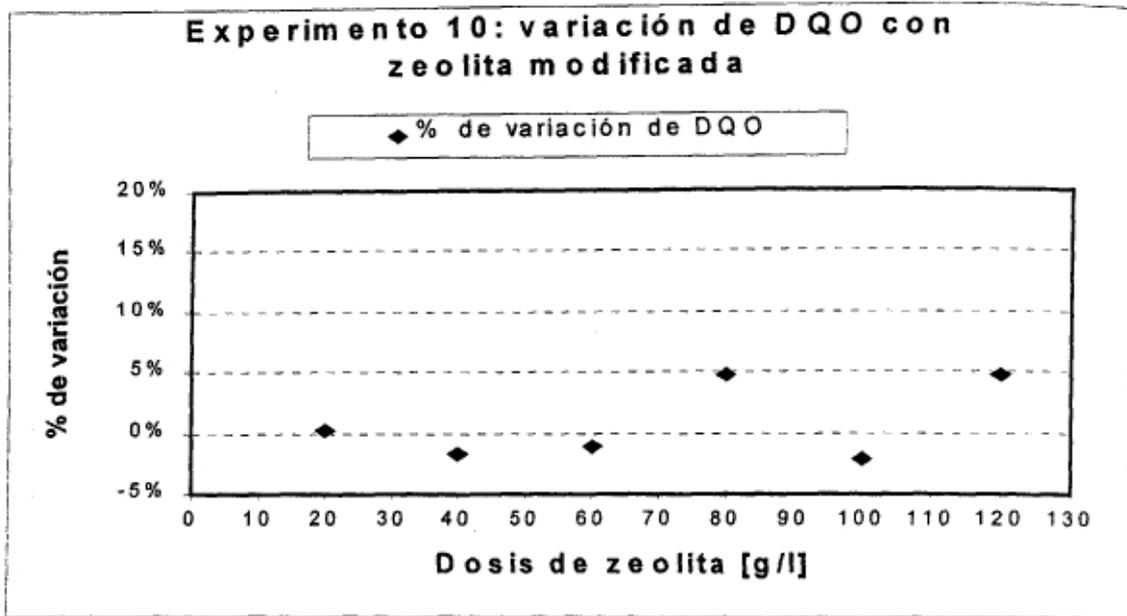


Figura 4.42: variación de DQO con zeolita modificada a pH inicial de 3.39.

Experimento 11

La muestra utilizada se modificó a un pH inicial de 9.17. En la remoción de color se observó un incremento en la cantidad de color para las primeras dos jarras con dosis de 10 y 20 g/l de zeolita modificada; posteriormente se observa un aumento en el porcentaje de remoción para las siguientes concentraciones. (Figura 4.43)

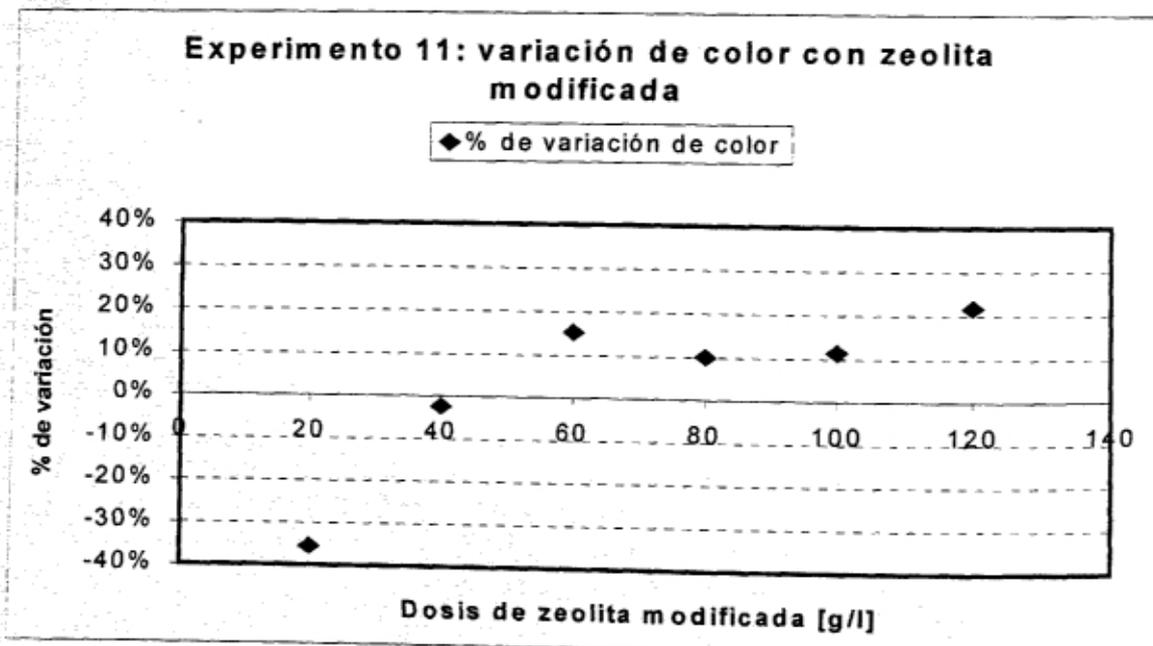


Figura 4.43: variación de color con zeolita modificada a pH inicial de 9.17.

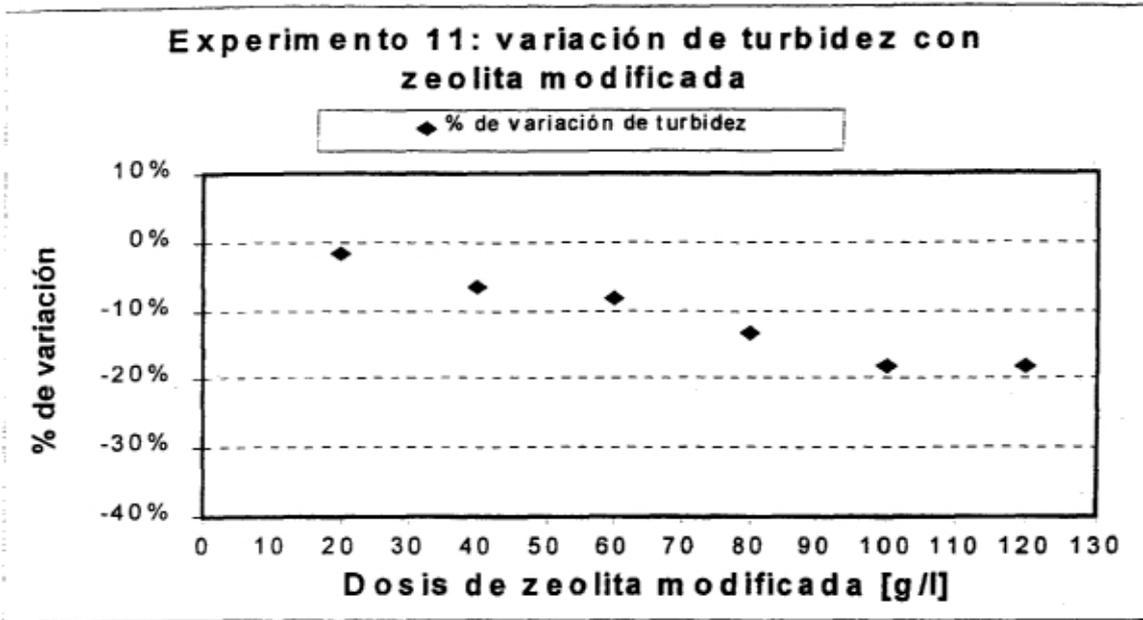


Figura 4.44: variación de turbidez con zeolita modificada a pH inicial de 9.17.

Para la turbidez, se observa un incremento con forme aumenta la dosis de zeolita. Dichos incrementos son del orden del 20 % para dosis de 50 y 60 g/l. (Figura 4.44). No se observaron índices remoción de DQO considerables. Los valores de remoción se mantuvieron aproximadamente en 0% para dosis hasta de 40 g/l , observándose una pequeña mejoría en los porcentajes de remoción (del orden del 15%) para concentraciones de 50 y 60 g/l de zeolita modificada. (Figura 4.45)

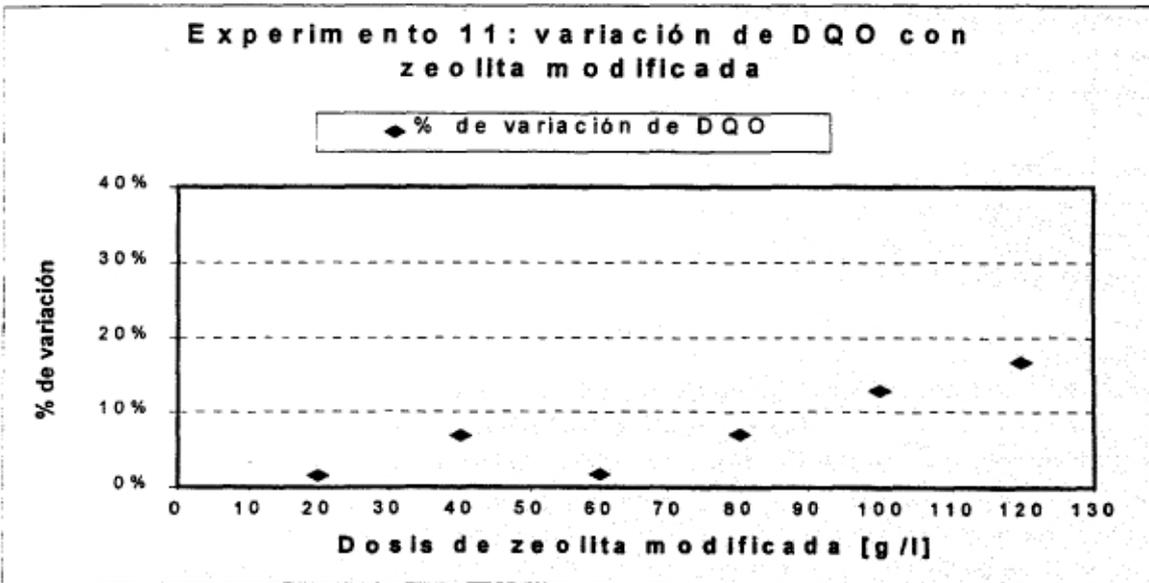


Figura 4.45: variación de DQO con zeolita modificada a pH inicial de 9.17.

Con base a los resultados obtenidos en los experimentos 8, 9, 10 y 11 se pueden hacer las siguientes inferencias.

1. La zeolita modificada químicamente con cloruro de cetilpiridinio es capaz de remover color de las muestras estudiadas (experimentos 8 y 10).
2. Con los resultados obtenidos no se puede asegurar que el pH tiene un efecto sobre la capacidad de adsorción de la zeolita modificada, para dicha adsorción más bien influye la composición de la muestra.
3. Los niveles de remoción de DQO son bajos, del orden del 5% al 10% debido a que la remoción de color también es muy baja, alrededor del 20% en promedio.
4. Los elementos contenidos en la muestra de agua residual, pueden ocasionar interferencia en el proceso de adsorción, razón por la cual los porcentajes de remoción para color son muy bajos.

Para comprobar el punto 4, es necesario realizar pruebas con muestras preparadas en forma artificial.

Experimento 12

Este experimento consistió en variar los valores de pH de una muestra obtenida de la planta. Se variaron los valores de pH mediante la adición de ácido sulfúrico o hidróxido de sodio, llevando las muestras de valores de pH ácidos hasta valores de pH básicos.

Los resultados se expresaron directamente en unidades de color y en unidades de DQO.

En el caso del color, se observa un decremento en las unidades de color (ver Figura 4.46), mientras que los valores de la demanda química de oxígeno permanecieron aproximadamente constantes. (Figura 4.47).

Los resultados ponen de manifiesto el efecto del pH en la molécula de color que contiene esta muestra de agua y el hecho de que la demanda química de oxígeno no se modifique, indican que la carga orgánica permanece, a pesar de que se observen cambios en la coloración.

4.4 Pruebas con muestra preparada artificialmente.

Se realizaron una serie de pruebas para evaluar la capacidad de adsorción de la zeolita natural como modificada, pero utilizando una muestra preparada en laboratorio solamente con colorante, con la finalidad de eliminar algunas variables que pudieran ocasionar interferencia en el proceso de adsorción de la zeolita, tales como los aditivos que contiene la muestra tomada de la empresa de la industria del teñido de alfombras.

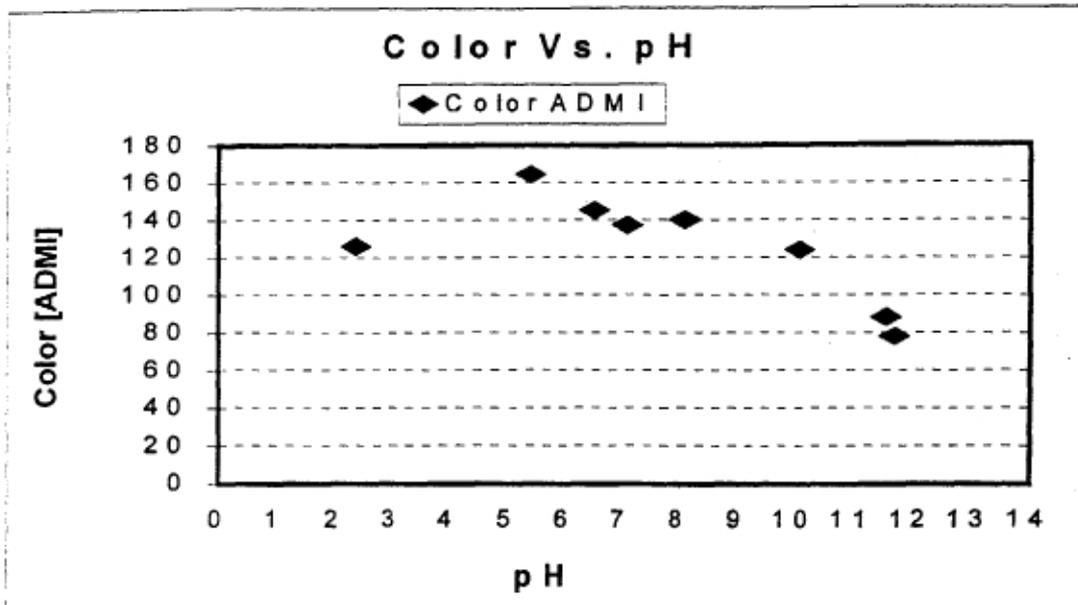


Figura 4.46: variación de color al variar los valores de pH

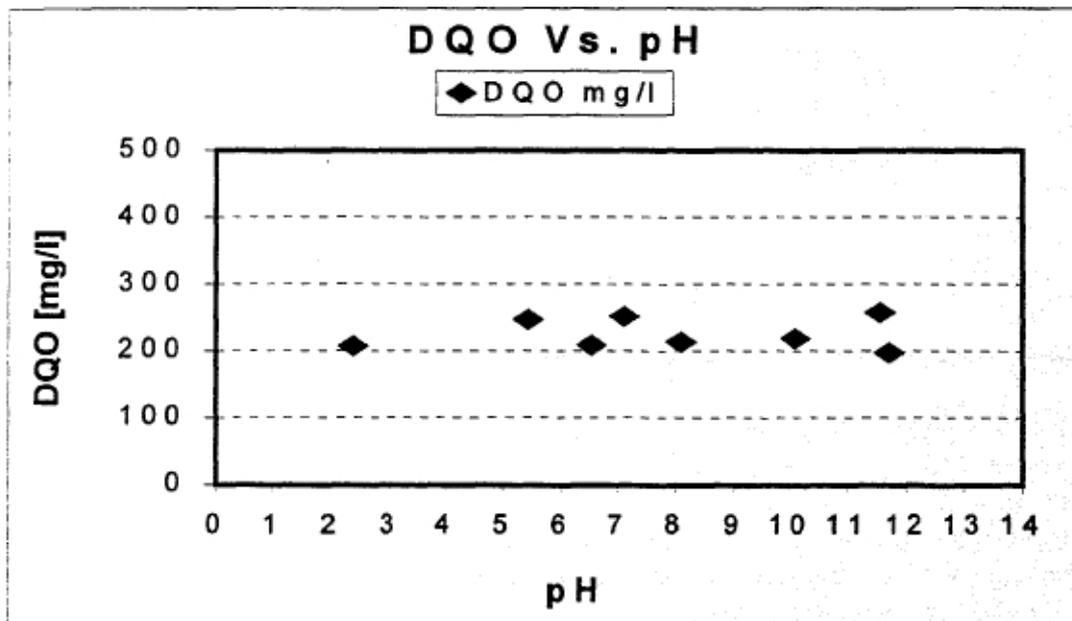


Figura 4.47: variación de color al variar los valores de pH.

Experimento 13

Este experimento consistió en variar los valores de pH de una muestra artificial con colorante, mediante la adición de ácido sulfúrico o hidróxido de sodio, variando la escala de valores del pH desde ácido hasta básico. El propósito de este experimento es evaluar el efecto que tiene la variación de pH en el color utilizado en esta muestra. Los resultados se describen a continuación. Como se puede apreciar en la Figura 4.48, no existe un efecto del pH en el color de la muestra ya que los valores de color en unidades Pt-Co permanecen constantes dentro de un mismo rango de valores.

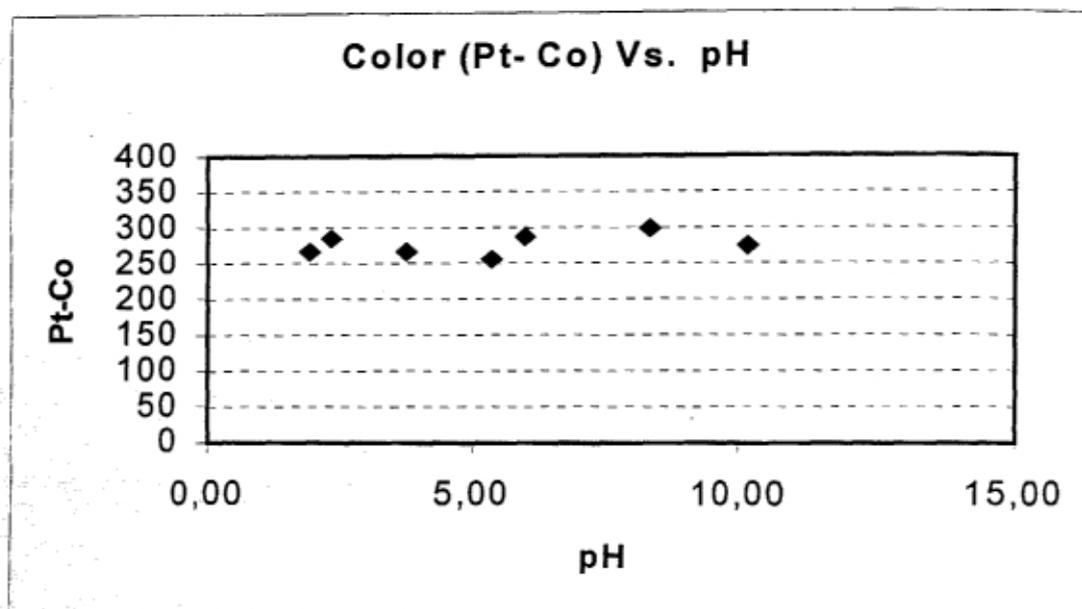


Figura 4.48: variación de color al variar los valores de pH

Si se compara este experimento con el experimento 12, se puede observar que en la muestra tomada de la industria de teñido de alfombras, si se observó variación en el color al variar el pH, pero hay que tomar en cuenta, que este tipo de muestra contiene otro tipo de colorante y una serie de aditivos que pueden modificar de alguna forma, junto con los cambios de pH, las características de la molécula de color cambiando la intensidad de color de la muestra.

Experimento 14

Zeolita natural y muestra artificial a pH = 6.912 para esta prueba no se observó remoción de color con zeolita natural, se observó un aumento en las unidades de color lo cual se refleja por una remoción negativa como se muestra en la Figura 4.49. Por este resultado se puede inferir, que la molécula de color presenta una carga negativa, por lo cual no puede ser adsorbida por la zeolita natural que para realizar el intercambio catiónico, requiere de un ión positivo.

Los valores del porcentaje de remoción de turbidez, también presenta valores negativos como se muestra en la Figura 4.50. El comportamiento de la DQO no sigue un patrón definido, tal como se puede apreciar en la Figura 4.51, pero con base a los resultados obtenidos para color y turbidez, podemos esperar que la DQO aumente o bien permanezca constante.

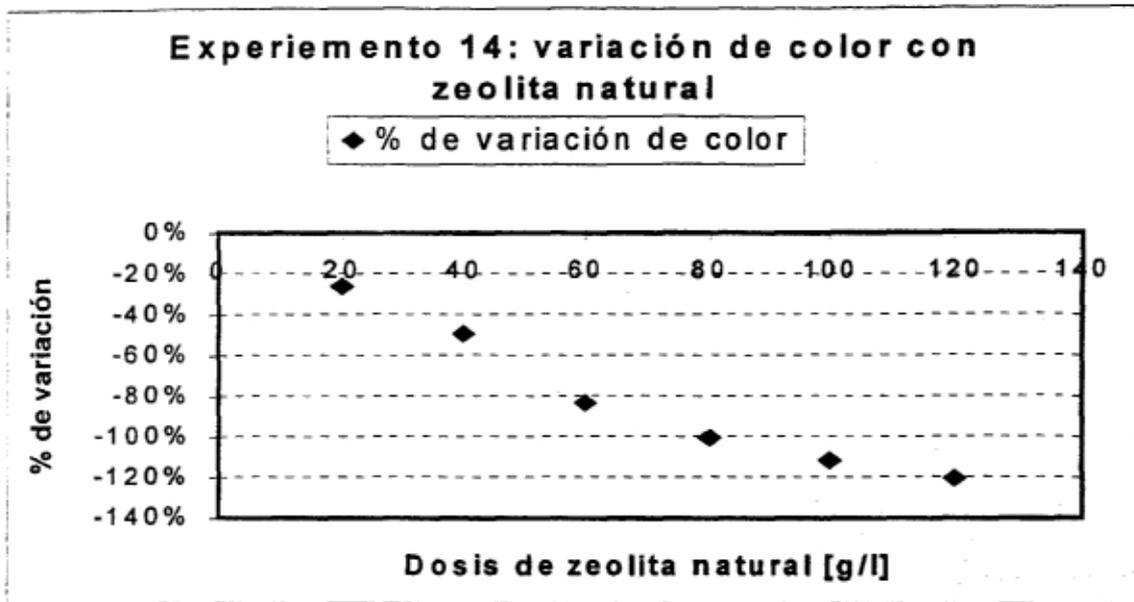


Figura 4.49: variación de color con zeolita natural y muestra artificial.

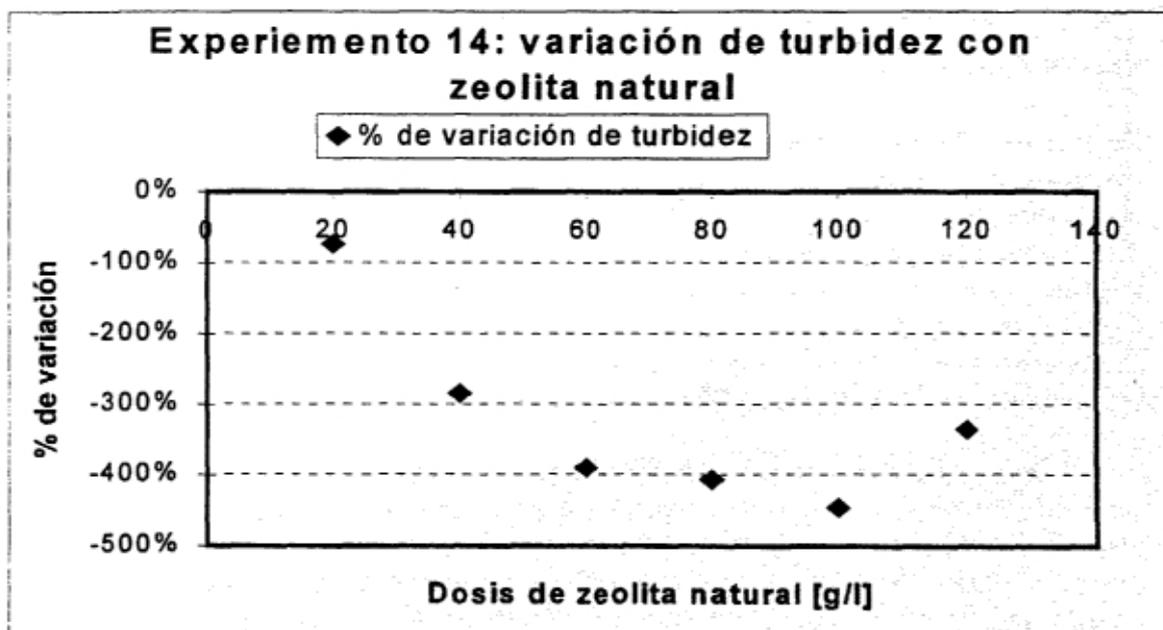


Figura 4.50: variación de turbidez con zeolita natural y muestra artificial.

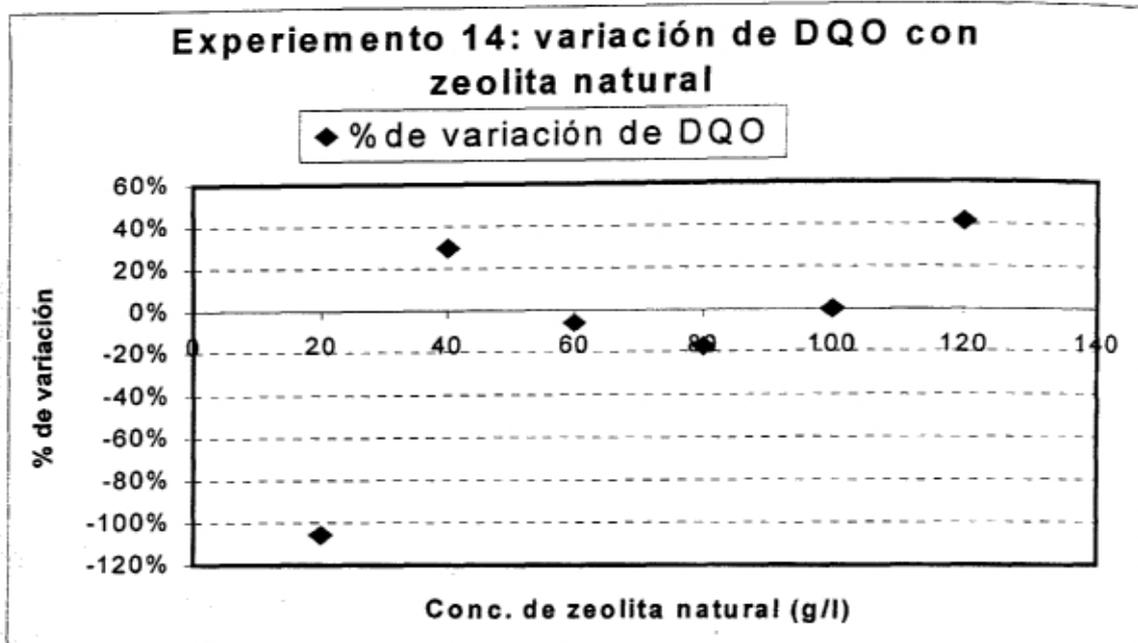


Figura 4.51: variación de la DQO con zeolita natural y muestra artificial.

Experimento 15

Zeolita modificada y muestra artificial a un pH inicial de 5.188. En este experimento se observaron porcentajes de remoción que alcanzan rangos hasta del 80% con concentraciones de zeolita de 40 mg/l. Estos resultados indican que la molécula de color utilizada para preparar la muestra artificial tiene carga negativa como se había inferido en el experimento 14. Por este motivo la zeolita modificada químicamente con cloruro de cetilpiridinio, es capaz de adsorber al color de la muestra como se puede apreciar en la Figura 4.52. Un comportamiento similar se puede observar en la remoción de turbidez y DQO, como se muestra en las Figuras 4.53 y 4.54 respectivamente.

Se observó que la zeolita modificada para el caso de la muestra de la planta si presenta remoción de color aunque en porcentajes muy bajos (del orden del 30%) mientras que con la muestra artificial se observan remociones hasta del 80%. Ahora bien, hay que tomar en cuenta de que la muestra de la palnta contiene otro tipo de sustancias en su composición que de alguna forma pueden causar interferencia en el proceso de adsorción de la zeolita modificada. Esto se observa al comparar las Figuras 4.40 y 4.52.

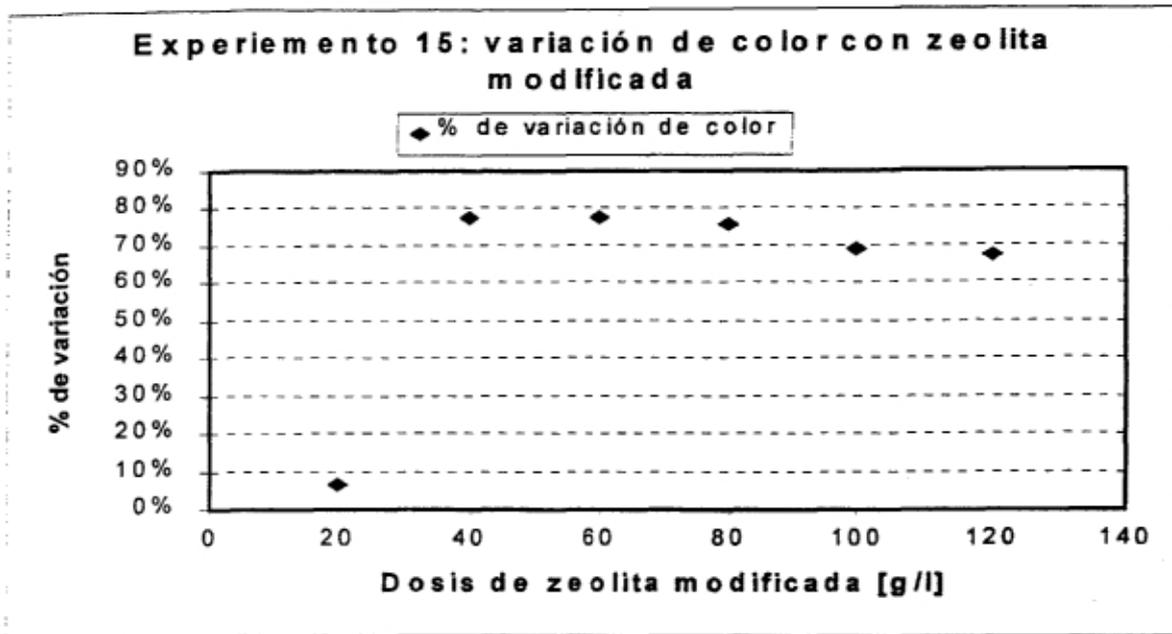


Figura 4.52: variación de color con zeolita modificada y muestra artificial.

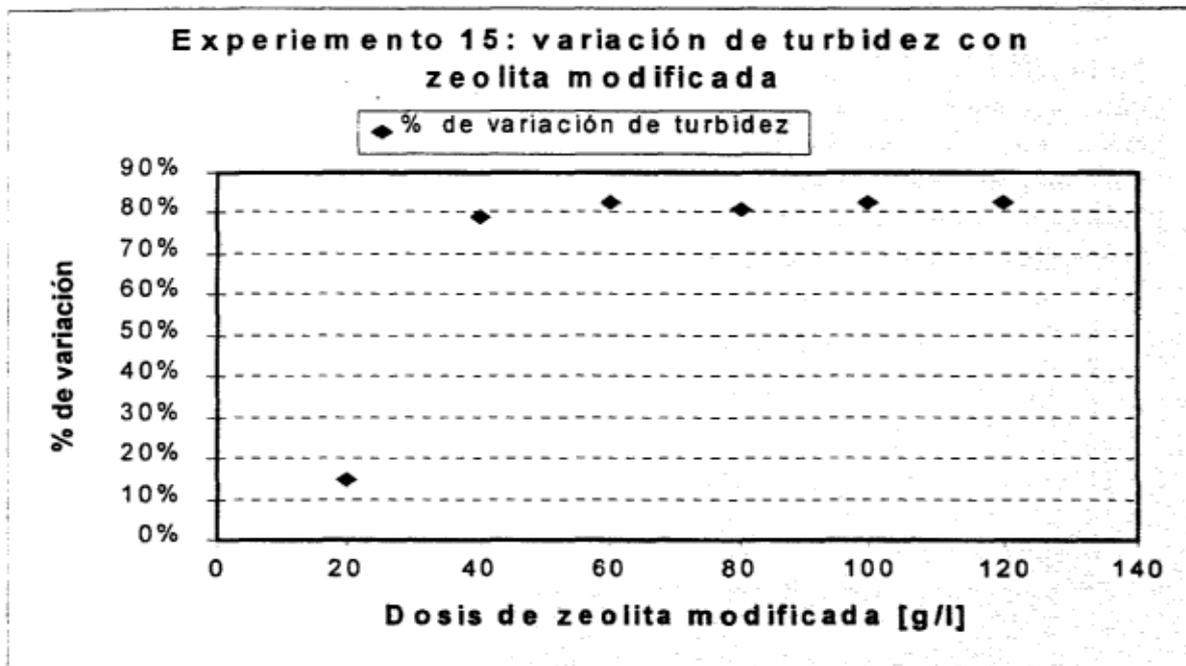


Figura 4.53: variación de turbidez con zeolita modificada y muestra artificial.

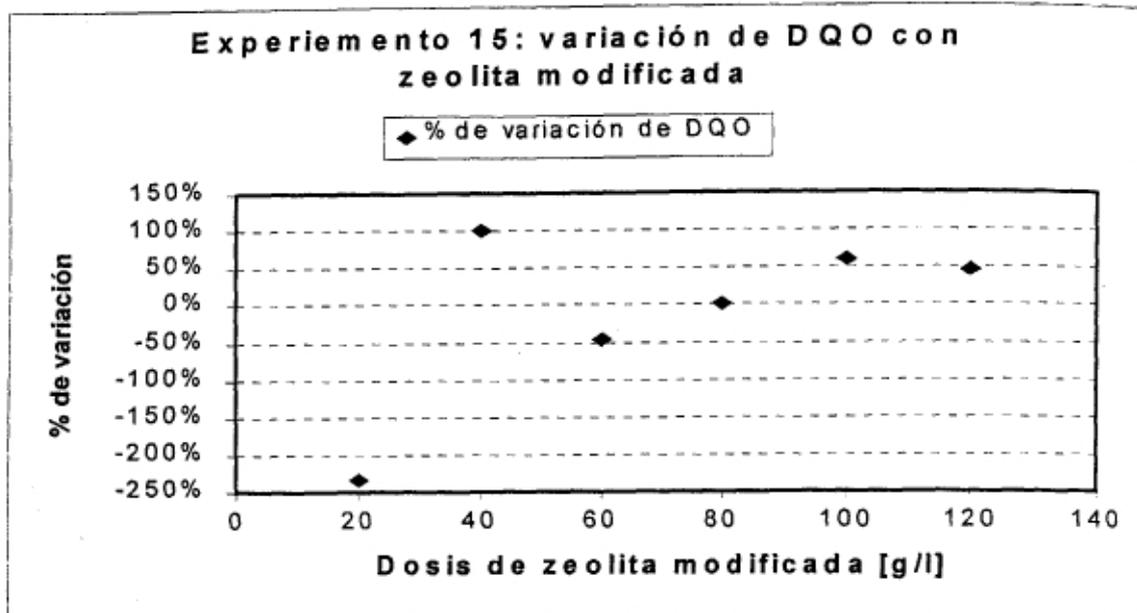


Figura 4.54: variación de DQO con zeolita modificada y muestra artificial.

Experimento 16

Se repitió el experimento anterior, solo que ahora con pH básico de 10. El propósito de este experimento es observar la interferencia de los iones OH^- en el proceso de adsorción, ya que pueden competir con las moléculas de color por los sitios de intercambio aniónico de la zeolita modificada. Los resultados muestran que el pH básico no presenta ningún tipo de interferencia con la adsorción del color por parte de la zeolita modificada. (Figura 4.55)

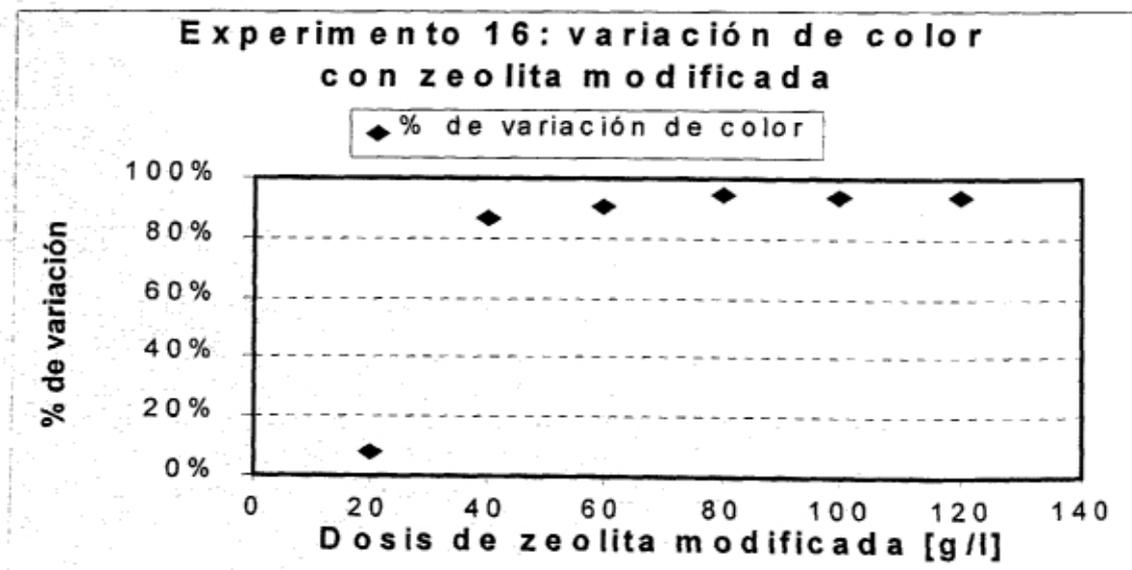


Figura 4.55: variación de color con zeolita modificada y muestra artificial.

También se observaron valores de remoción de turbidez y DQO como se puede apreciar en las Figuras 4.56 y 4.57 respectivamente.

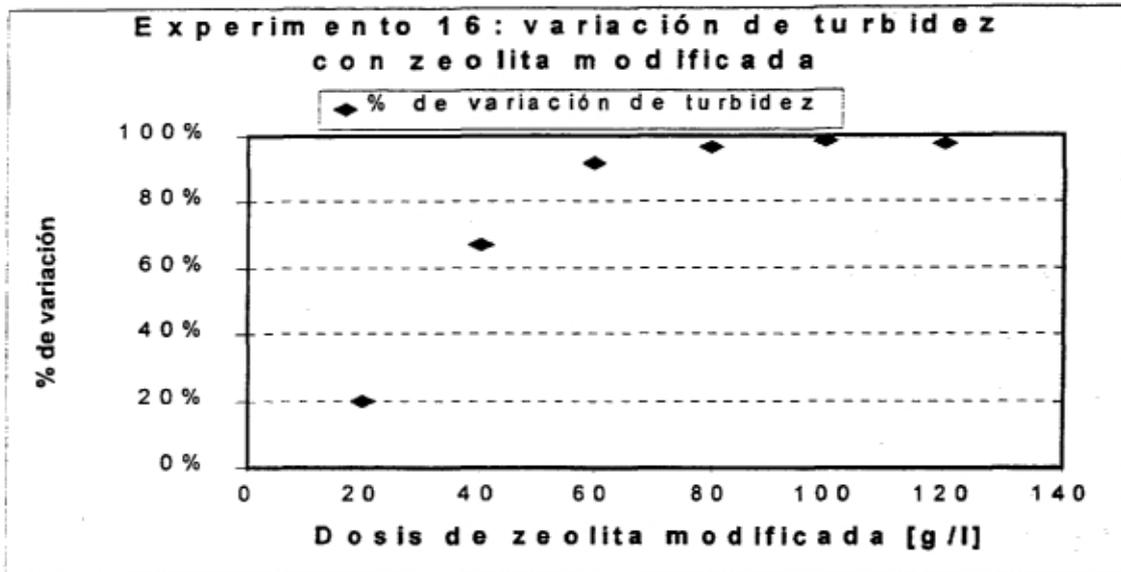


Figura 4.56: variación de turbidez con zeolita modificada y muestra artificial.

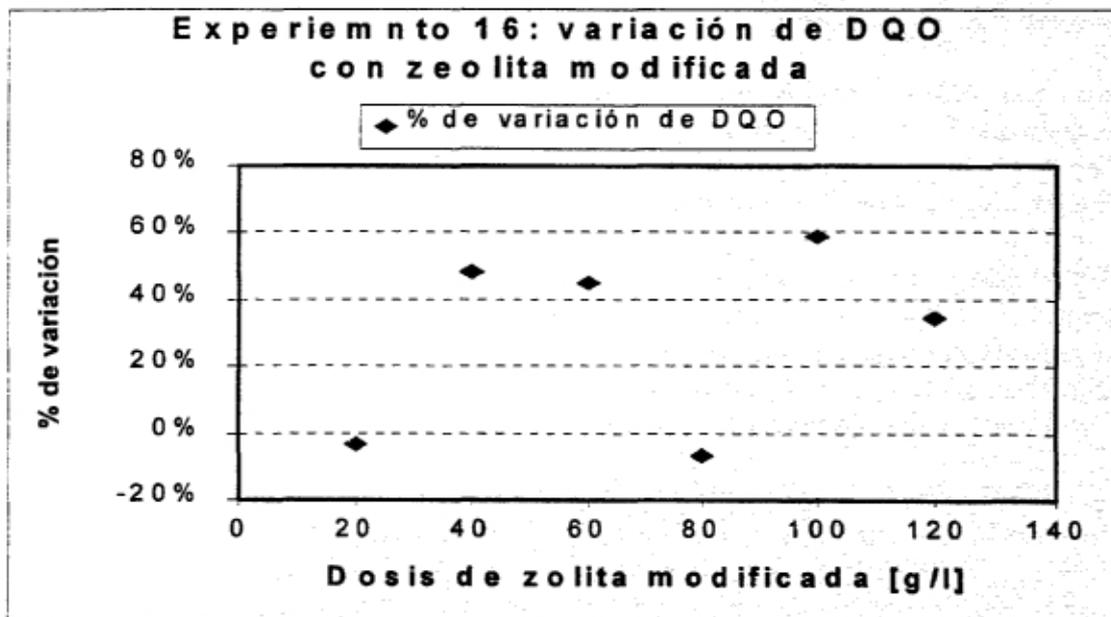


Figura 4.57: variación de DQO con zeolita modificada y muestra artificial.

En base a los resultados de este se pueden hacer las siguientes inferencias:

1. Para la muestra artificial y para el tipo de colorante empleado en esta muestra, se observa adsorción del color hasta del 90% por la zeolita modificada químicamente a pH básicos, después de un período de sedimentación de 24 horas.
2. Se observa remoción de turbidez a niveles del 90% después de un periodo de sedimentación de 24 horas.
3. Para el caso de muestras obtenidas de la planta, y base a los resultados de los experimentos 9 y 11, puede ser que el colorante utilizado en los lotes que se emplearon para la experimentación, sea de naturaleza distinta desde el punto de vista químico y por ello no presente carga predominantemente negativa en su molécula o bien, los compuestos presentes en la muestra, tales como antiespumante, ácido acético, dispersante; entre otros, tengan cierto tipo de interferencia, de tal manera que la molécula de color no pueda ser adsorbida.

Experimento 17

Zeolita modificada químicamente con cloruro de cetilpiridinio, con una concentración fija de 60 mg/l y una cantidad variable de ácido acético en una muestra artificial. La cantidad de ácido acético se calculó en función a las proporciones utilizadas en el teñido de las alfombras en planta. La finalidad de este experimento es el dilucidar la influencia que puede tener el ácido acético en el proceso de adsorción del color en la zeolita modificada químicamente.

Los resultados obtenidos se expresan en porcentaje de remoción. Para el caso de turbidez y DQO son la referencia inicial es se toma como la muestra antes de adicionar la zeolita y con una concentración de ácido acético que va de 0.04% en volumen hasta 0.24%, con incrementos de 0.04 %.

En el caso del color existe una remoción aproximadamente constante, que va de un rango de 70% a 90%, como se aprecia en la Figura 4.57. Este comportamiento indica que la zeolita sigue teniendo efecto adsorbente sobre las moléculas de color a pesar de la presencia de ácido acético y que el aumento en la concentración de ácido acético no tiene efecto significativo en el proceso de adsorción.

El comportamiento del porcentaje de remoción de turbidez es similar al de color, como se puede apreciar en la Figura 4.58. Este comportamiento indica que la zeolita es capaz de adsorber componentes de la muestra que ocasionan turbiedad. El comportamiento aproximadamente constante en los porcentajes de remoción (con un rango de 70% a 80% de remoción) indica que el aumento en la concentración de ácido acético no tiene un efecto significativo.

En el caso de la DQO, se observó un comportamiento errático y poco consistente con los resultados anteriores. Este comportamiento no tiene una razón aparente tal como se muestra en la Figura 4.60

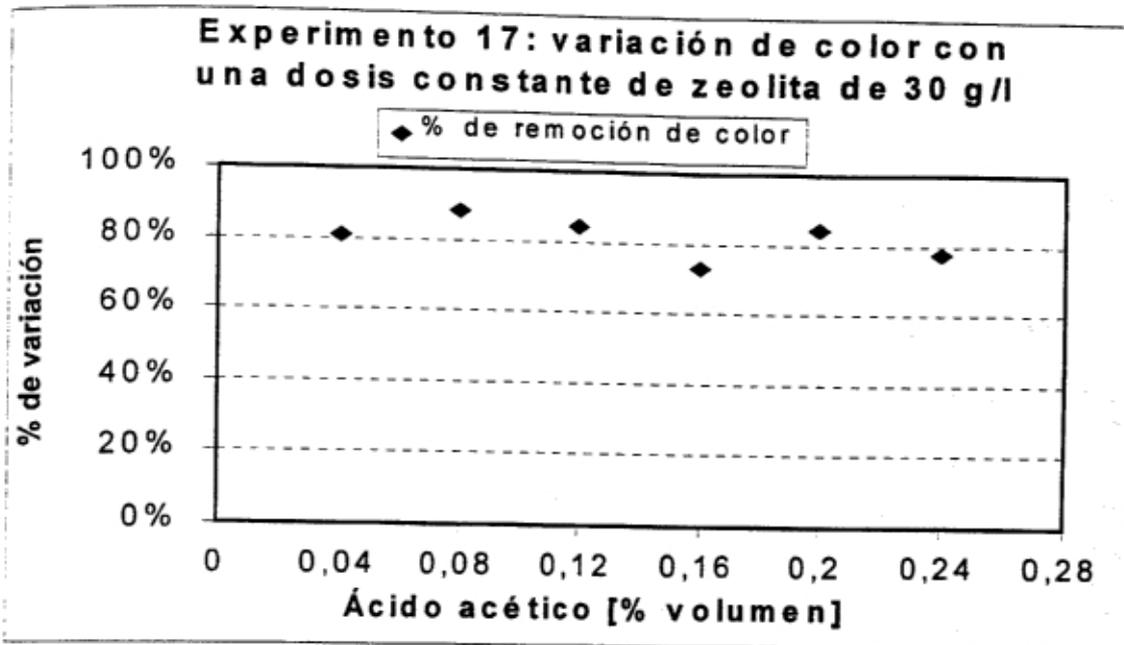


Figura 4.58: variación de color con una concentración constante de zeolita y muestra artificial con ácido acético

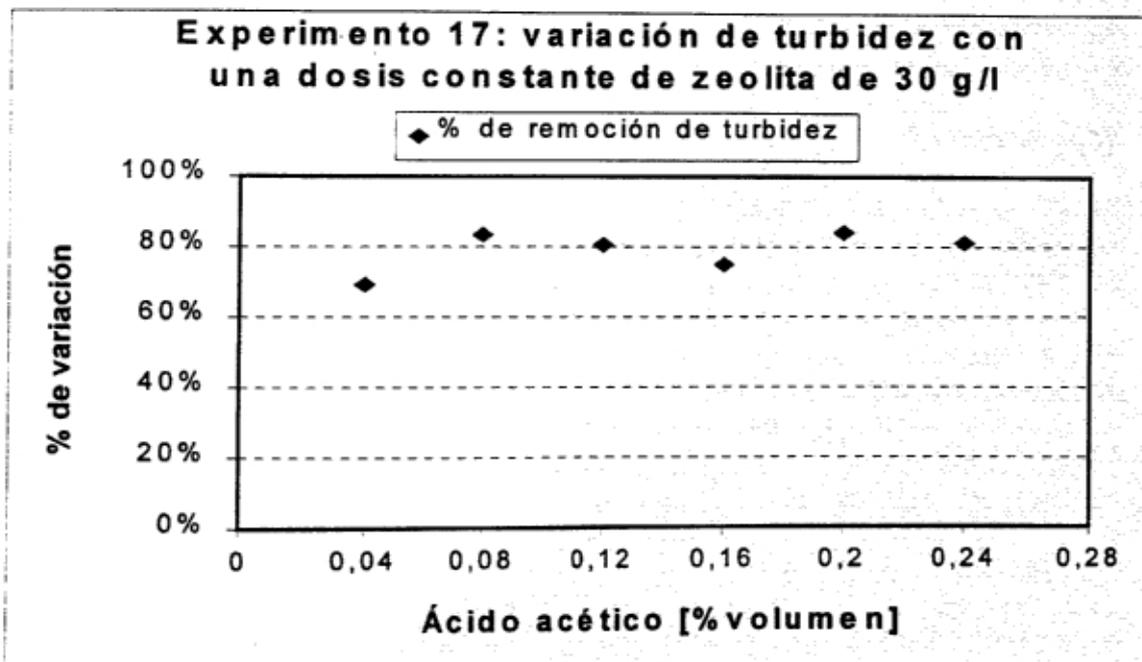


Figura 4.59: variación de turbidez con una concentración constante de zeolita y muestra artificial con ácido acético

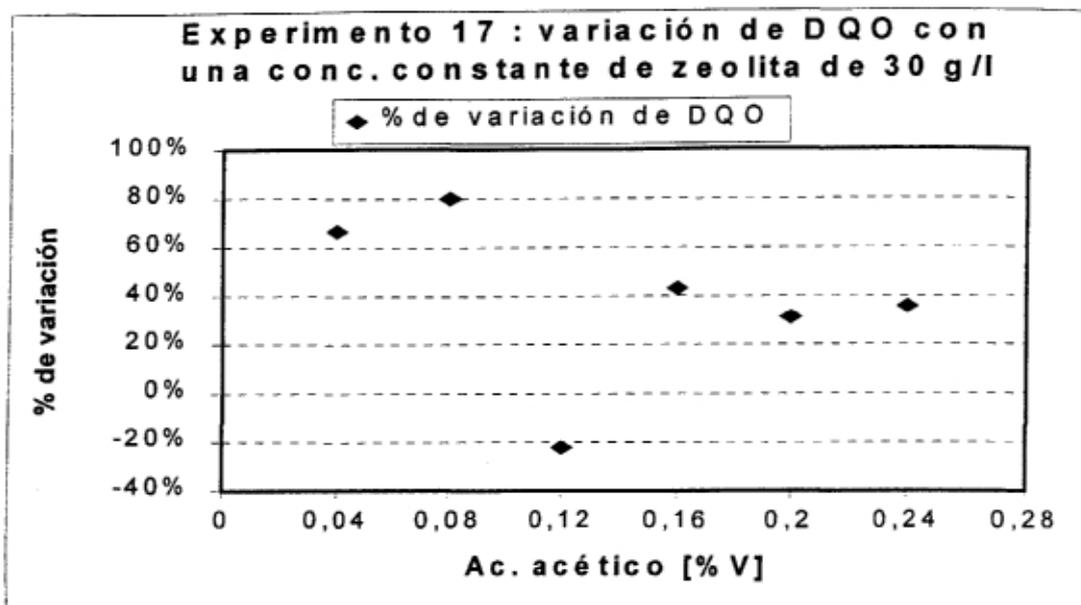


Figura 4.60: variación de DQO con una concentración constante de zeolita y muestra artificial con ácido acético

Aparentemente el efecto que tiene el ácido acético es solo como un modificador de pH y no afecta en el proceso de adsorción de la zeolita sobre las moléculas de color.

Experimento 18

Zeolita modificada químicamente con cloruro de cetilpiridinio, con una concentración fija de zeolita de 60 mg/l y una cantidad variable de detergente (dispersante). La cantidad de detergente, nuevamente se calculó en función a las proporciones utilizadas en el teñido de alfombras. Este experimento se realizó con la finalidad de diferenciar el efecto que el dispersante tiene sobre la adsorción de la zeolita modificada sobre las moléculas de color. Los resultados obtenidos se expresan en porcentaje de remoción. Al igual que en el experimento 17, para el caso de turbidez y DQO, los porcentajes de remoción se obtienen con respecto a la concentración medida antes de adicionar la zeolita con respecto a la medida después de adicionada, además de agregar una concentración de detergente que varía de 0.2 g a 1.2 g para cada jarra.

Los dispersantes son tensoactivos o agentes que tiene su efecto en la tensión superficial del agua. Su efecto es disminuir la tensión superficial del agua permitiendo que esta "penetre" en la trama del tejido, aumentando su capacidad de teñido. Los más comunes son sales de ácidos sulfónicos y son llamados en el mercado como detergentes aniónicos, porque el extremo polar de la molécula es un anión (+) alquilsulfonato. Un ejemplo de sal sódica sulfonada es el p - Decilbencenosulfonato sódico, que es un detergente aniónico. Su fórmula semicondensada es: $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_9\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}^{-3} \text{Na}^+$.

Para explicar los resultados obtenidos en este experimento, además de las gráficas que muestran el porcentaje de remoción se analizarán el comportamiento de los parámetros antes y después de adicionar la zeolita con concentración constante. En las Figura 4.61 (a) y (b) se muestra el comportamiento del color antes y después de la adición de zeolita y en la 4.62 se muestra el porcentaje de remoción.

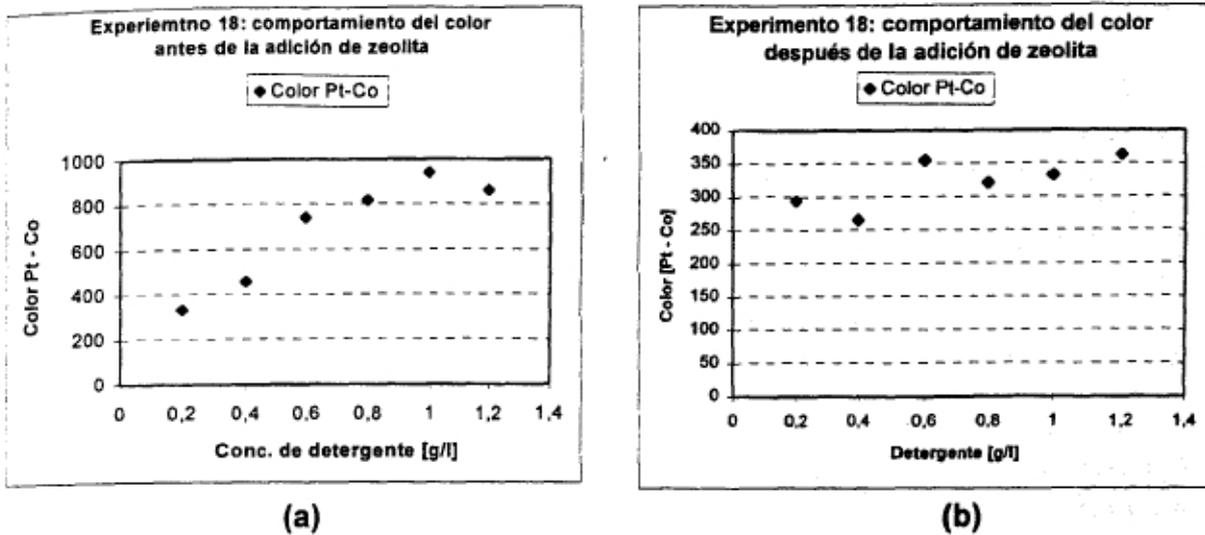


Figura 4.61: comportamiento del color con una muestra artificial antes y después de la adición de zeolita modificada.

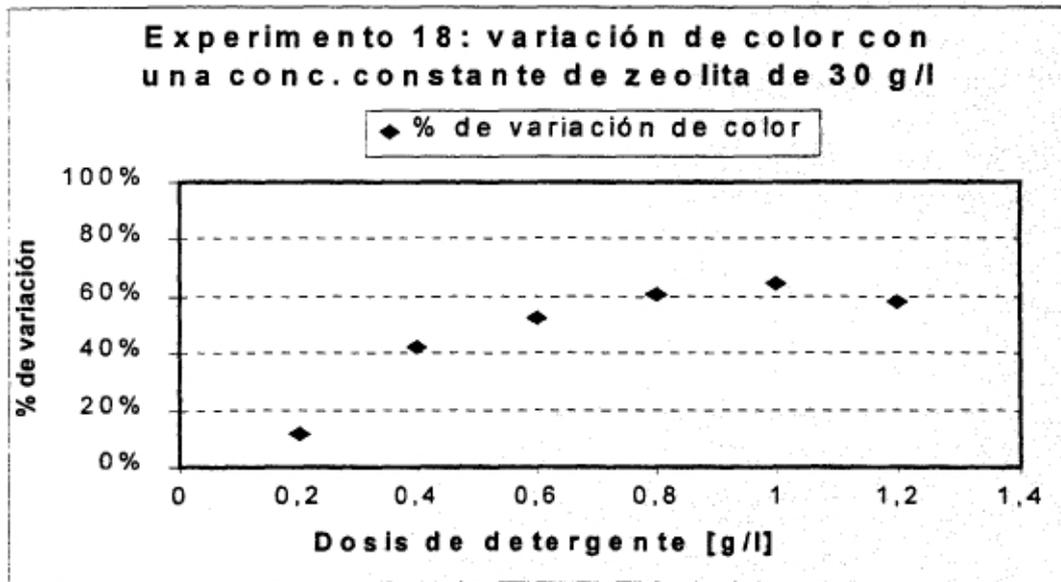


Figura 4.62: variación de color con una concentración constante de zeolita y muestra artificial con detergente.

Antes de la adición de zeolita se observa un aumento en las unidades de color conforme aumenta la concentración de detergente. Después de la adición de la zeolita

modificada, el color resultante permanece aproximadamente constante pero a valores de 300 unidades de Pt-Co, bajo comparado con los valores obtenidos inmediatamente después de la adición del detergente. Esto puede deberse a que la zeolita adsorbe al detergente, que tiene un grupo sulfónico de carga negativa, además de una cadena de hidrocarburos que pueden interactuar con el cetilpiridinio, evitando que la molécula de color se adsorba.

Al observar el porcentaje de remoción de color, se presenta un incremento a medida que aumenta la concentración de detergente, a pesar de que la inspección visual de la muestra no aparenta tener remoción alguna, ni la zeolita se tiñe de azul, como paso en el experimento 17. Esto hace suponer que la remoción observada no se debe precisamente a que se eliminen moléculas de color, sino a que se está eliminando detergente que tiene carga positiva debida al sodio.

Para el caso del análisis de turbidez se obtienen resultados similares que para color. Antes de la adición de arcilla a las muestras, se observa que la turbidez aumenta en forma lineal y ascendente. Después de la adición de zeolita, la turbidez permanece constante, pero nuevamente, la intensidad de color observada no disminuye, por lo que se asume que la adsorción que realiza la zeolita modificada es de detergente.

Lo anterior se puede observar en la Figura 4.63 donde se observa el comportamiento de la turbidez antes y después de la adición de zeolita. En la Figura 4.64 se puede observar el comportamiento del porcentaje de remoción en turbidez.

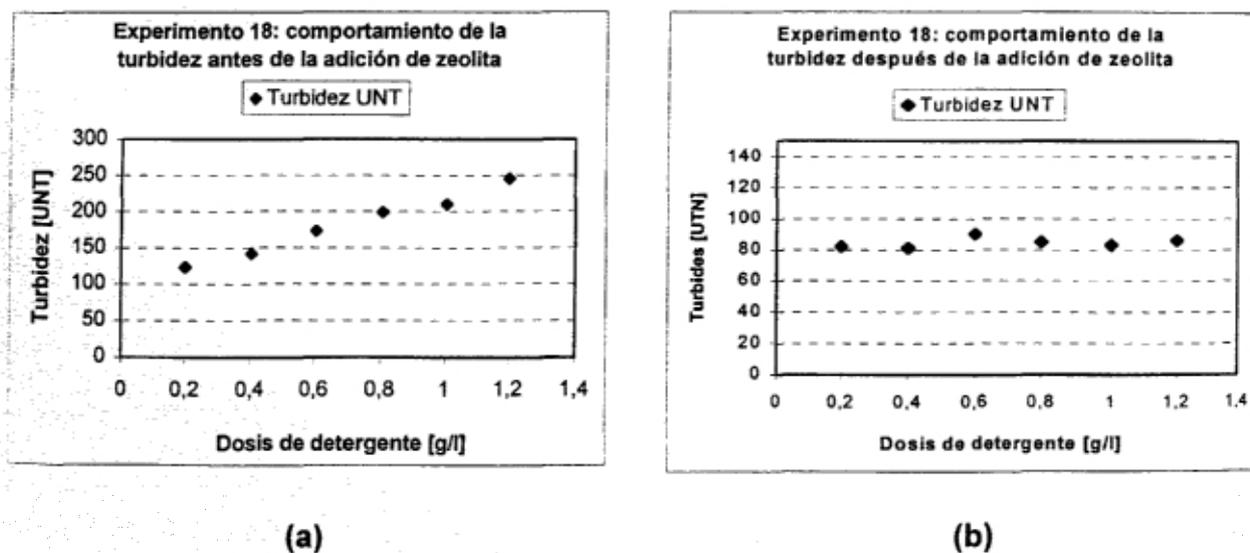


Figura 4.63: comportamiento de la turbidez con una muestra artificial antes y después de la adición de zeolita modificada.

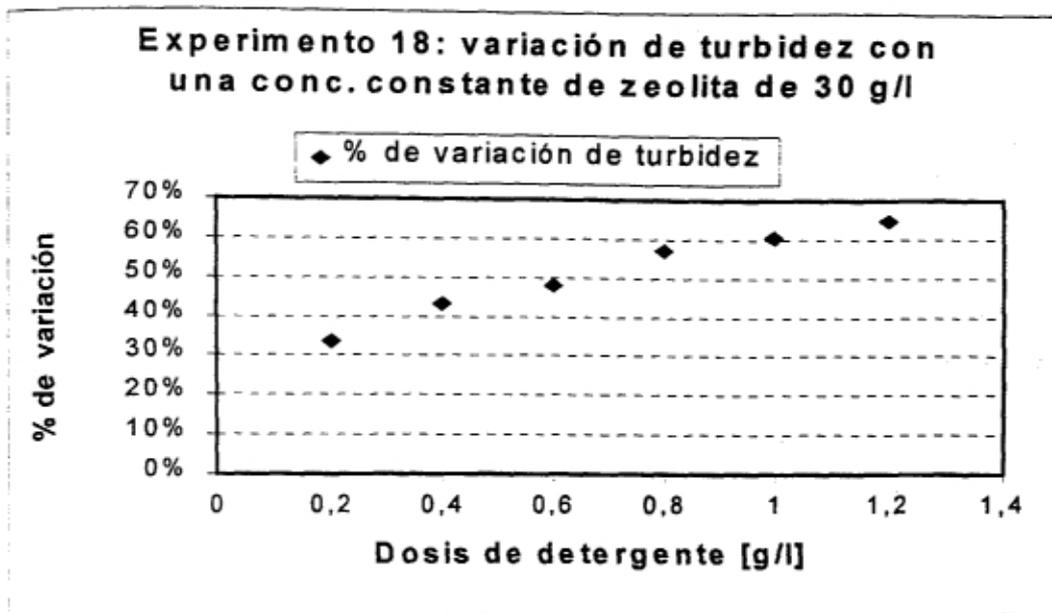


Figura 4.64: variación de turbidez con una concentración constante de zeolita y muestra artificial con detergente.

En el caso de la DQO, antes de la adición de zeolita, se observa un ascenso a medida que aumenta la concentración de detergente. Después de la adición de la zeolita, la concentración de DQO permanece aproximadamente constante. Esto vuelve a dar evidencia de que la zeolita está adsorbiendo detergente por la carga positiva que éste presenta. Es difícil afirmar que se adsorben moléculas de color debido a que en la inspección visual no se observó ningún tipo de decremento en la intensidad del color. (Figuras 4.65 y 4.66)

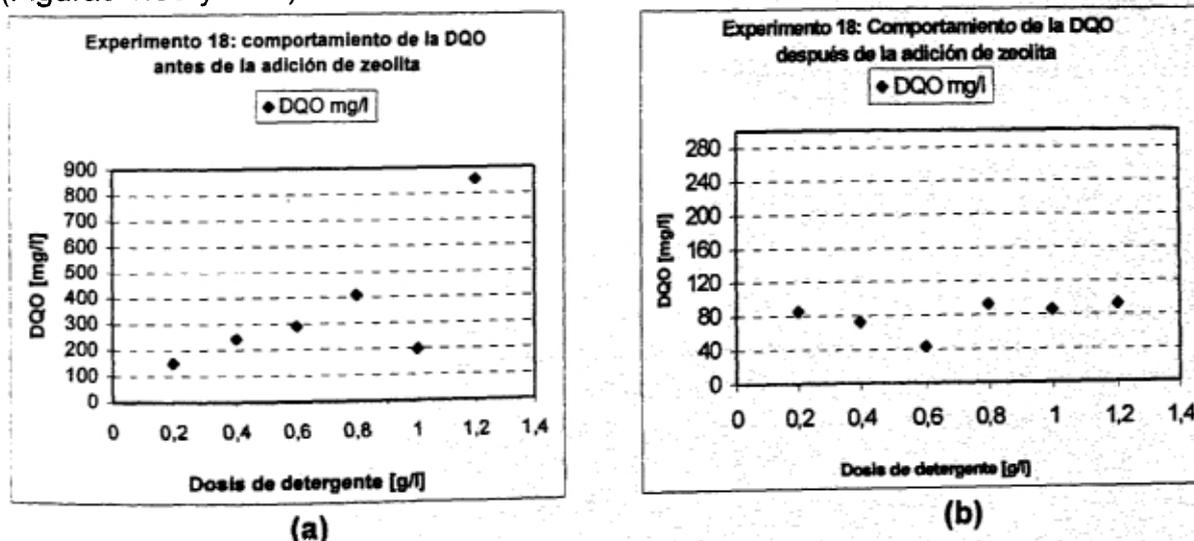


Figura 4.65: comportamiento de la DQO con una muestra artificial antes y después de la adición de zeolita modificada.

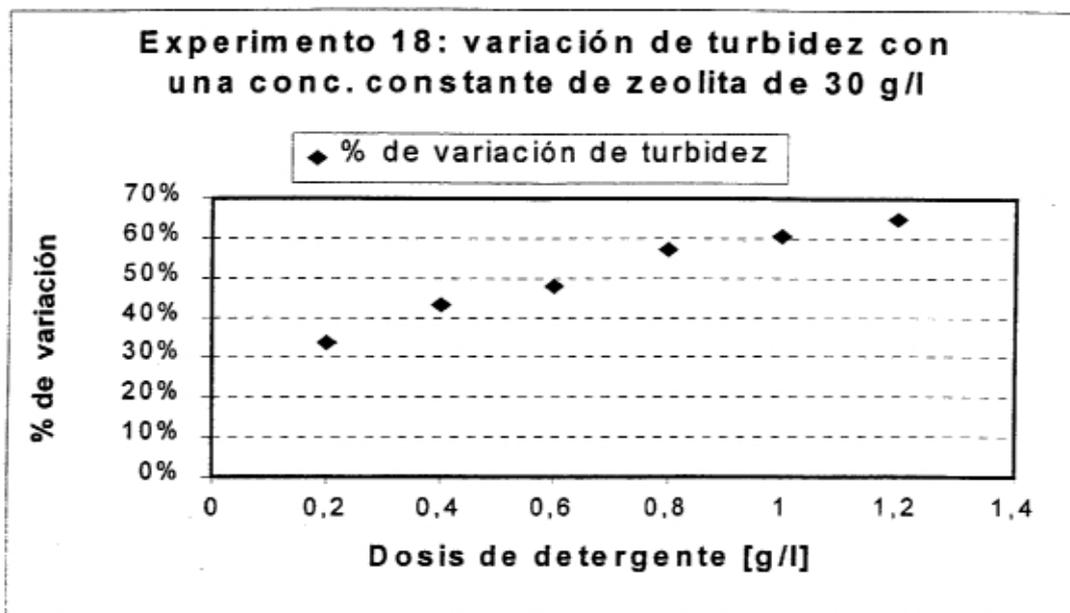


Figura 4.64: variación de turbidez con una concentración constante de zeolita y muestra artificial con detergente.

En el caso de la DQO, antes de la adición de zeolita, se observa un ascenso a medida que aumenta la concentración de detergente. Después de la adición de la zeolita, la concentración de DQO permanece aproximadamente constante. Esto vuelve a dar evidencia de que la zeolita está adsorbiendo detergente por la carga positiva que éste presenta. Es difícil afirmar que se adsorben moléculas de color debido a que en la inspección visual no se observó ningún tipo de decremento en la intensidad del color. (Figuras 4.65 y 4.66)

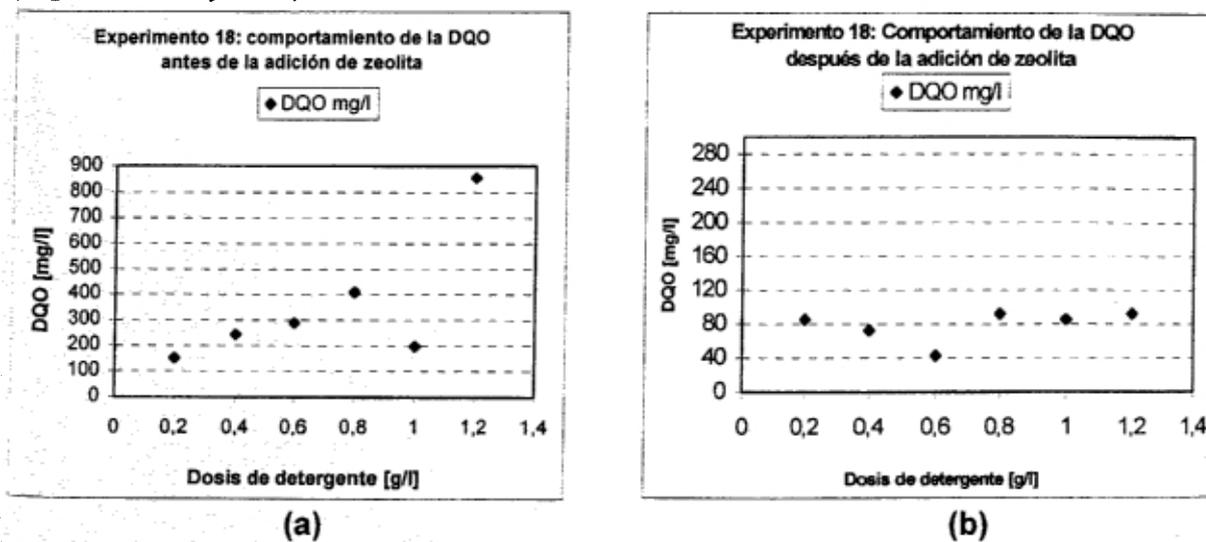


Figura 4.65: comportamiento de la DQO con una muestra artificial antes y después de la adición de zeolita modificada.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

Las conclusiones se pueden dividir en tres grupos: evaluación de la arcilla decolorante para la remoción de color, evaluación de la zeolita natural para la remoción de color y la evaluación de la zeolita modificada con cloruro de cetilpiridinio para la remoción de color.

Arcilla decolorante

Podemos afirmar que la arcilla decolorante no tiene efecto significativo en la remoción de color de los colorantes contenidos en el agua residual estudiada, debido que no se presenta el mecanismo de adsorción esperado en la superficie de la arcilla aún haciendo variaciones en el pH de la muestra.

Los experimentos 1 y 2 están orientados a definir la capacidad de adsorción de la arcilla decolorante y las dosis necesarias. Con base a la experimentación se puede concluir que el incremento de las dosis de arcilla no tiene efecto en la remoción de color, en cambio, el sulfato de aluminio, a valores de pH entre 7 y 8, alcanza remociones de color del orden del 90%.

Zeolita natural

El efecto de remoción de la zeolita natural está en función directa del tipo de colorante utilizado en el proceso de teñido.

La zeolita natural es capaz de remover color de aguas residuales, sólo si la molécula de color tiene carga predominantemente positiva. Las condiciones de pH pueden modificar la carga de la molécula de color, pero existen moléculas que no se alteran ante las condiciones de pH.

En el caso de las muestras empleadas, es posible obtener remociones de color y DQO pero depende de las características de la muestra y el tipo de aditivos agregados al lote, debido a que estos ocasionan interferencia en el proceso de adsorción entre la molécula de color y la zeolita natural. Lo anterior se deduce debido a que para diferentes lotes de agua residual, en algunas ocasiones se obtienen remociones de color (experimento 5 y 6) y en otras no (experimentos 3, 4 y 7). De acuerdo a los datos presentados en la tabla 2.3, existen compuestos que se adicionan al baño de color que son hasta 13 veces el orden de magnitud del colorante utilizado, lo que hace suponer que debe tener un efecto de interferencia.

En resumen, la zeolita natural es capaz de adsorber las moléculas de color contenidas en la muestra de agua residual, para cierto tipo de colorantes cuya carga sea positiva a diferentes condiciones de pH. Se observa una buena remoción para valores de pH ácidos.

Zeolita modificada con cloruro de cetil piridinio

En base a los experimentos realizados, se puede concluir que la zeolita modificada con cloruro de cetilpiridinio es capaz de remover color de las muestras de agua residual, cuando los colorantes tienen la carga negativa. En el experimento 15 se utilizó una muestra artificial sólo con colorante y se obtuvieron remociones del orden del 90%, lo que indica que la molécula de color debe tener carga negativa y es adsorbida por la zeolita modificada con carga positiva, removiéndose el color al sedimentar la zeolita modificada.

El ácido acético no produce interferencia en la remoción de color ni ésta se ve afectada por los cambios de pH como se puede apreciar en los experimentos 15 y 16, aunque este comportamiento está muy relacionado con el tipo de colorante, ya que hay algunos colorantes que cuya estructura se ve modificada con los cambios de pH.

Los dispersantes (detergentes) ocasionan interferencia en el proceso de adsorción de color, ya que son moléculas con tres cargas negativas que compiten con el color por los sitios con carga positiva de la zeolita modificada. Esto ocasiona que el color permanezca visible en las muestras estudiadas y la remoción observada en la medición con espectrofotómetro se debe a la remoción de las moléculas de detergente.

Recomendaciones

1. Al tener conocimiento del tipo de colorantes que se utilizan en los lotes de teñido se puede diseñar un sistema de tratamiento adecuado para el agua proveniente después del teñido, mediante el empleo de zeolitas naturales o modificadas, por ello se recomienda tener una caracterización completa del tipo de colorantes empleados en el proceso de teñido.
2. Un estudio posterior a este trabajo puede ser el diseño de columnas empacadas con zeolita natural o modificada, o bien columnas con ambas zeolitas y determinar los parámetros de diseño de la columna tales como flujos, tiempo de residencia, agotamiento de la zeolita, entre otros.

Bibliografía

Amirtharajah, A. y Kirk M. Mills, "*Rapid-mix design for mechanism of alum coagulation*", Journal AWWA, 1982, pp. 210-216

Besoain, Eduardo, "*Mineralogía de arcilla de suelos*", Instituto interamericano de cooperación para la agricultura, San José Costa Rica, 1985.

Both, G. "*Imperial Chemical Industries PLC*", Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry, A). Ed. VCH, pp. 76-82, Rep. Dem. Alemana, 1986.

Brek, D. W., "*Zeolite: molecular sieves*", Ed. John Willy and Sons Inc., 1974

Cadena, F. , Cázares E., et. al., "*Remoción de arsénico de aguas subterráneas utilizando zeolitas modificadas químicamente*", pre-propuesta presentada a la Fundación México-Estados Unidos para la ciencia, 1993.

Casa Arata, Francisco, "*Diccionario de la Industria Textil*", editorial Labor, S.A., España, 1969

Cazares R. E., "*Adsorción de coromo hexavalente en zeolitas modificadas químicamente*", reunión de intercambio de experiencias en investigación del sistema ITESM, 1994.

Clesceri, Lenores S., Greenberg, Arnold E. y otros, "*Selected physical and chemical standard methods for students, based on standard methods for the examination of water and wastewater 17th edition*", APHA-AWWA-WPCF, Estados Unidos, 1990.

Eick, Matthew J. , Bar-Tal, Asher, et. al., "*Analyses of adsorption kinetics using stirred-flow chamber. II. Potassium-Calcium exchange on clay minerals*", Soil science society american journal, Vol. 54, september-october, 1990.

Enciclopedia britanica on line, <http://biblioteca.itesm.mx/cgi-in/salta?http://www.eb.com:180/>

Jimenez, Concepción, "*Zeolitas modificadas químicamente: su uso en la remoción de cromo hexavalente de aguas*", tesis de maestría, División de graduados en investigación, ITESM, Monterrey, N.L., 1994

Johnson, P. y A. Amistharajah, "*Ferric chloride and alum as a single and dual coagulants*", Journal of AWWA, 1983, pp. 232-239

Mickelson, G. y R. Secor, "*Enciclopedia de tecnología química Kirk and Othmer*", II, UTEHA, 1966, pp. 690-695

Mittal, Atul K. y C. Venkobachar, "*Sorption and desorption of dyes by sulfonated coal*", Journal of Environmental Engineering, Vol. 119, No. 2, March-April, 1993, pp 1472-1474

Mittal, Atul K. y C. Venkobachar, "*Uptake of cationic dyes by sulfonated coal: sorption mechanism*", Industrial Engineering Chemistry Research, Vol. 35, No. 4 , 1996, pp 1472-1474

Mumpton, F.A. and Fishman, P. H., "*The application of natural zeolites in animal science and aquaculture*", Journal of animal science, Vol. 45, No. 5, 1977

NOM-AA-45-1981, UNINET, Centro de calidad ambiental, ITESM, Monterrey, N.L. Elizondo, Oscar, "*Evaluación de metodologías para el tratamiento de aguas residuales provenientes de los procesos de teñido de una empresa manufacturera de alfombras* ", tesis de maestría, División de graduados en investigación, ITESM, Monterrey, N.L., 1998

Pratt, Lyde Stuart , "*The chemistry and physics of organic pigments*", primera edición, Wiley, New York ,1947

Rabo, J., "*Zeolite, chemistry and catalysis*", Ed. American Chemical Society, 1976.

Ruthven, D. M., "*Zeolite as a selective adsorbents*", Chemical engineering Progress, february, 1988.

Stanley, H.Pine, Hendrickson, James B. y otros, "*Química Orgánica*", Mc Graw Hill, cuarta edición, México 1982.

The society of Dyers and Colourists & American Association of textile chemists and colorists, "*Colour index*", Third edition, V. 2, 4, 6, 7, 8, 9

Venkataraman, Krishnasami , "*The chemistry of synthetic dyes*", V. 3, New York , Academic Press, 1952

Villamar, R. (1996), "*Hoja técnica de propiedades de la arcilla bentonítica activada Floxet BCA*", 1996, pp. 1, Monterrey, N.L.

Zhu, L. Zhong, Li, Yimin y Zhang, Jianying, "*Sorption of organobentonites to some organic pollutants in water*", *Environmental Science & Technology*, Vol. 31, No. 5, 1997.

Zhang, Peng-Chu y Donald L. Sparks, "*Kinetics of phenol and aniline adsorption and desorption on an organo-caly*", *Soil Science Society American Journal*, Vol. 57, march-april 1993, pp. 340-345

Apéndice A

Material o equipo utilizado durante la experimentación

Material o Equipo	Especificaciones
Matraz Kitazato	500 ml
Vaso de precipitado	500 ml, 250 ml
Espátulas	Metálica plana y acanalada
Pipetas graduadas	1, 5 y 10 ml
Picetas	Plástico
Frasco para reactivos	vidrio y plástico
Balanza analítica	Sartorius analitic
Espectrofotómetro	Hach
Viales	vidrio marca Hach
Balanza analítica	Ohaus

Reactivos utilizados durante la experimentación.

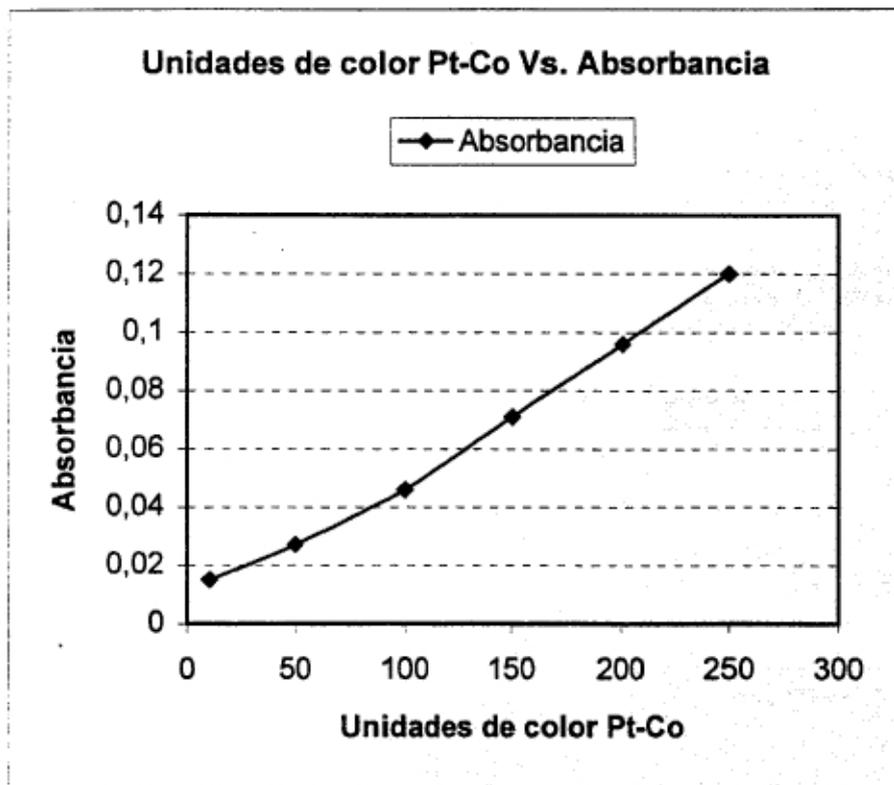
Reactivo	Marca
Arcilla decolorante (activada)	Villamar (proveedor)
Agua destilada	Gardal
Zeolita del yacimiento de Sonora	s/e
Dicromato de potasio	Fisher scientific Company
Sulfato de mercurio	Productos Químicos Monterrey
Sulfato de plata	Productos Químicos Monterrey
Acido sulfúrico	Productos Químicos Monterrey
Cloruro de cetilpiridinio	Alfa

Curva de calibración para la medición de color Pt - Co
 Longitud de onda utilizada = 420 nm

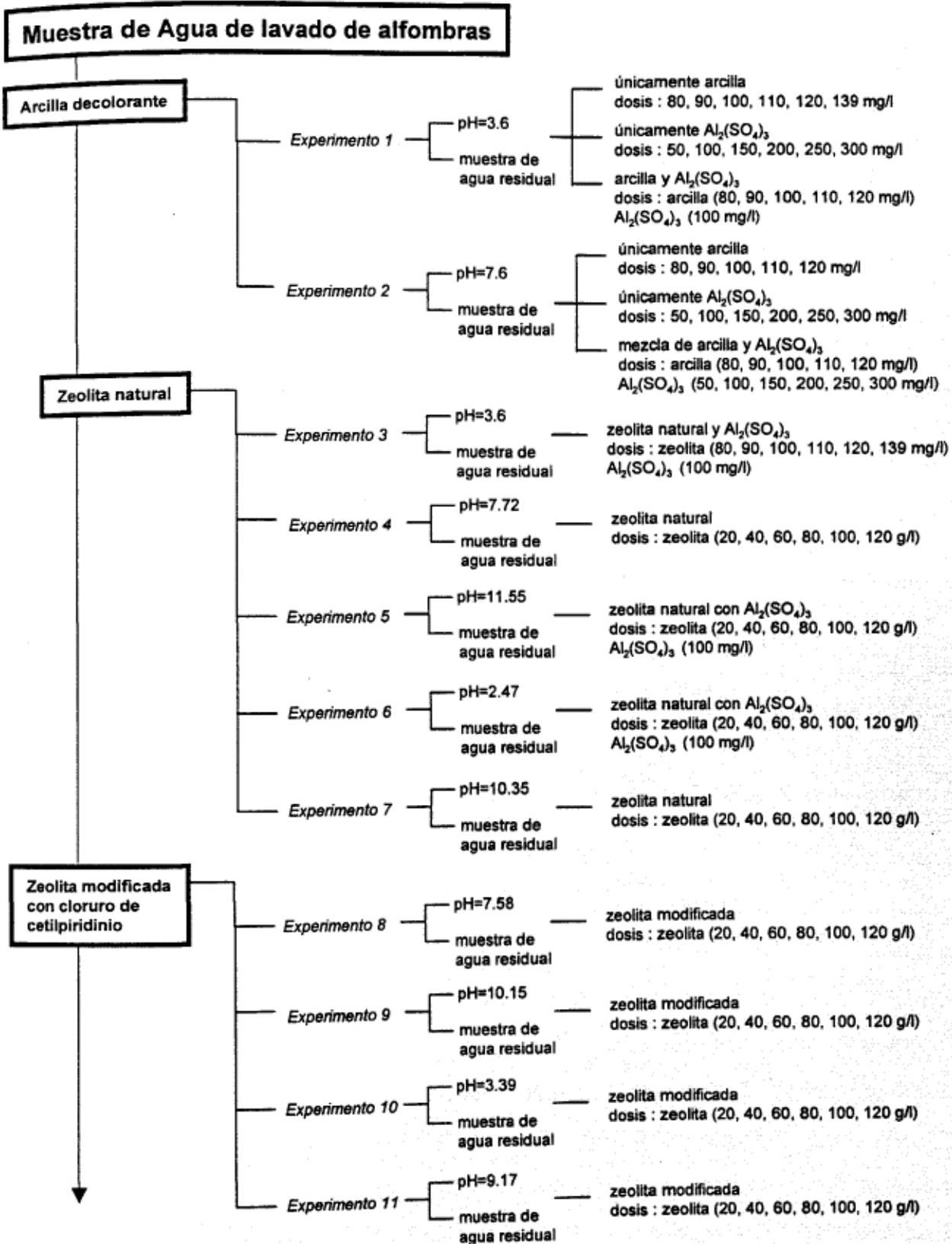
Se prepararon las siguientes soluciones de color de acuerdo con lo que indica la norma NOM-AA-45-1981

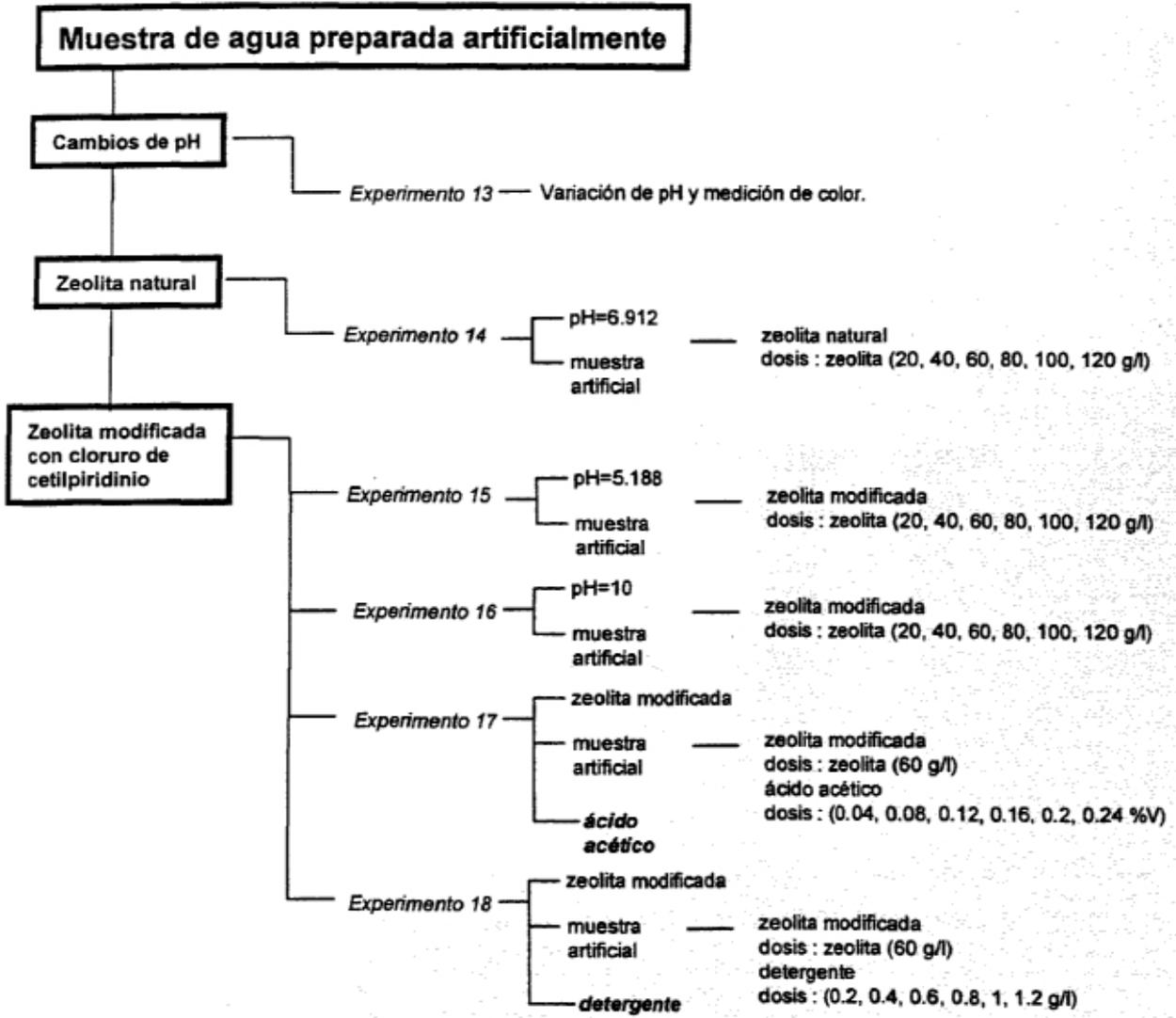
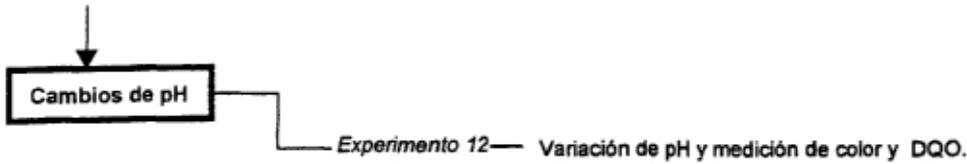
Pt - Co	Absorbancia
10	0,015
50	0,027
100	0,046
150	0,071
200	0,096
250	0,12

b = 4E-04
 a = 0,006



Apéndice C





Experimento 1

Fecha de realización: 23 de marzo 1998

Condiciones iniciales de la muestra

pH	<u>3,6</u>
turbidez =	<u>19,1</u> NTU
Color	<u>88</u> ADMI
DQO =	<u>765</u> mg/l

Uso de arcilla

No. Jarra	Conc. Arcilla ppm	pH	Color	Turbidez [NTU]	DQO [mg/l]
	0	3,6	88	19,1	765
1	80	3,6	92	19,5	1011
2	90	3,6	86	20,4	852
3	100	3,6	108	20	893
4	110	3,6	92	20,2	847
5	120	3,6	93	20,3	844
6	130	3,6	93	19,6	841

Uso de sulfato de aluminio

No. Jarra	Conc. Alumbre [ppm]	pH	Color	Turbidez [NTU]	DQO [mg/l]
	0	3,6	88	19,1	765
1	50	3,6	93	20,2	983
2	100	3,5	104	23,3	940
3	150	3,5	99	25	904
4	200	3,5	105	26,4	942
5	250	3,5	105	28,4	953
6	300	3,5	111	30	972

Uso de arcilla y sulfato de aluminio

No. Jarra	Conc. de Alumbre [ppm]	Conc. Arcilla [ppm]	pH	Color	Turbidez [NTU]	DQO [mg/l]
	0	0	3,6	88	19,1	765
1	50	80	3,5	90	19,4	888
2	100	90	3,5	96	20,8	883
3	150	100	3,5	106	26,7	807
4	200	110	3,5	97	25	851
5	250	120	3,5	100	25,7	844
6	300	130	3,5	153	45,2	871

Experimento 2

Fecha de realización: 23 de mayo 1998

Condiciones iniciales de la muestra

pH	<u>7,6</u>
turbidez =	<u>43,5</u> NTU
Color	<u>111</u> ADMI
DQO =	<u>396</u> mg/l

Uso de arcilla decolorante

No. Jarra	Conc. Arcilla		Color	Turbidez [NTU]	DQO [mg/l]
	ppm	pH			
	0	7,593	111	43,5	396
1	80	7,318	71	44,7	425
2	90	7,266	99	58	440
3	100	7,124	136	61,7	427
4	110	7,161	213	63	446
5	120	7,16	129	66,4	427
6	130	7,263	86	66	425

Uso de sulfato de aluminio

No. Jarra	Conc. Alumbre [ppm]	pH	Color	Turbidez [NTU]	DQO [mg/l]
1	50	6,593	124	57,4	450
2	100	6,277	88	41,8	395
3	150	5,994	27	12,5	282
4	200	5,664	16	8,1	275
5	250	5,12	14	8,1	255
6	300	4,783	17	9,4	243

Uso de arcilla y sulfato de aluminio

No. Jarra	Conc. de Alumbre [ppm]	Conc. Arcilla [ppm]	pH	Color	Turbidez [NTU]	DQO [mg/l]
1	50	80	7,12	61	45,1	437
2	100	90	7,06	37	18,1	459
3	150	100	7,22	18	4,4	290
4	200	110	6,92	17	2,7	261
5	250	120	6,52	13	2,1	236
6	300	130	5,896	10	1,7	255

Experimento 3

Fecha de realización: 28 de junio 1998

Condiciones iniciales de la muestra

pH	<u>7,11</u>
turbidez =	<u>47</u> NTU
Color	<u>138</u> ADMI
DQO =	<u>960</u> mg/l
Alcalinidad=	<u>960</u> mg de CaCO ₃ /l

Uso de zeolita natural

No. Jarra	Conc. zeolita ppm	pH	Color arcilla [ADMI]	Color alumbre [ADMI]	Turbidez [NTU]	DQO [mg/l]
	0	7,11	138	138	47	251
1	80	6,99	132	66	12,3	195
2	90	6,94	134	63	12,1	185
3	100	7,02	130	66	11,7	200
4	110	6,95	139	61	17,1	358
5	120	6,97	130	53	14,9	216
6	130	7,06	135	70	12,8	231

Experimento 4

Fecha de realización: 28 de junio 1998

Condiciones iniciales de la muestra

pH	<u>7,11</u>
turbidez =	<u>47</u> NTU
Color	<u>138</u> ADMI
DQO =	<u>960</u> mg/l
Alcalinidad=	<u>960</u> mg de CaCO ₃ /l

Uso de zeolita natural

No. Jarra	Conc. zeolita [g/L]	pH	DQO [mg/l]	Color [Pt-Co]	Turbidez [NTU]
	0	7,241	2811,43	1152,5561	190
1	20	7,194	2228,57	1197,3991	259
2	40	7,211	2125,71	1488,8789	276
3	60	7,235	2125,71	1331,9283	310
4	80	7,235	2400,00	1305,0224	320
5	100	7,208	1782,86	1914,8879	339
6	120	7,211	2125,71	1780,3587	350

Experimento 5

Fecha de realización: 6 de junio 1998

Condiciones iniciales de la muestra

pH 7,11
turbidez = 47 NTU
Color 138 ADMI
DQO = 960 mg/l
Alcalinidad= 960 mg de CaCO₃/l

Uso de zeolita natural

No. Jarra	Conc. zeolita g/l	pH	Color [ADMI]	Turbidez [NTU]	DQO [mg/l]
	0	11,55	88	106	257
1	20	10,58	79	37,8	208
2	40	10,04	90	32,9	183
3	60	9,83	65	29,6	195
4	80	9,6	68	24,9	168
5	100	10,8	73	59	193
6	120	10,73	71	57,1	190

* A esta prueba se le adicionó una cantidad constante de sulfato de aluminio de 100 ppm a cada jarra

Experimento 6

Fecha de realización: 17 de junio 1998

Condiciones iniciales de la muestra

pH 7,11
turbidez = 47 NTU
Color 138 ADMI
DQO = 960 mg/l
Alcalinidad= 960 mg de CaCO₃/l

Uso de zeolita natural

No. Jarra	Conc. zeolita g/l	pH	Color	Turbidez [NTU]	DQO [mg/l]
	0	2,47	112	41	257
1	20	2,43	81	57	264
2	40	2,5	70	59	189
3	60	2,55	53	54	161
4	80	2,64	49	53	184
5	100	2,63	45	43	149
6	120	2,67	55	39	167

* A esta prueba se le adicionó una cantidad constante de sulfato de aluminio de 100 ppm a cada jarra

Experimento 7

Fecha de realización: 17 de junio 1998

Condiciones iniciales de la muestra

pH	<u>10,35</u>
turbidez =	<u>193</u> NTU
Color	<u>1085,3</u> ADMI
DQO =	<u>2811,42</u> mg/l

Uso de zeolita natural

No. Jarra	Conc. zeolita [g/L]	pH	DQO mg/l	Color Pt-Co	Turbidez UNT
	0	10,35	2811,4286	1085,2915	193
1	20	9,241	2365,7143	1215,3363	233
2	40	9,143	1954,2857	1372,287	255
3	60	9,075	2057,1429	1228,7892	258
4	80	9,034	1954,2857	1157,0404	275
5	100	8,9448	1748,5714	1000,0897	276
6	120	8,875	1885,7143	1058,3857	269

Experimento 8

Fecha de realización: 18 de junio 1998

Condiciones iniciales de la muestra

pH	<u>7,58</u>
turbidez =	<u>48</u> NTU
Color	<u>246</u> ADMI
DQO =	<u>885</u> mg/l

Uso de zeolita modificada con cloruro de cetilpiridinio

No. Jarra	Conc. zeolita [g/l]	pH	Color [ADMI]	Turbidez [NTU]	DQO [mg/l]
	0	7,58	246	48	885
1	20	6,31	161	32	893
2	40	6,37	177	36	878
3	60	6,33	187	37	868
4	80	6,48	242	33	817
5	100	6,51	260	42	842
6	120	6,44	260	40	897

Experimento 9

Fecha de realización: 18 de junio 1998

Condiciones iniciales de la muestra

pH	<u>10,15</u>
turbidez =	<u>48</u> NTU
Color	<u>246</u> ADMI
DQO =	<u>885</u> mg/l

Uso de zeolita modifocada con cloruro de cetilpiridinio

No. Jarra	Conc. zeolita g/l	pH	Color Pt - Co	Turbidez [NTU]	DQO [mg/l]
	0	10,15	446	48	938
1	20	9,87	fuera de rango	84	987
2	40	9,81	fuera de rango	100	981
3	60	9,65	fuera de rango	127	965
4	80	9,6	fuera de rango	141	960
5	100	9,53	fuera de rango	146	953
6	120	9,5	fuera de rango	179	950

Experimento 10

Fecha de realización: 18de junio

Condiciones iniciales de la muestra

pH	<u>3,39</u>
turbidez =	<u>84</u> NTU
Color	<u>375</u> ADMI
DQO =	<u>876</u> mg/l

Uso de zeolita modifocada con cloruro de cetilpiridinio

No. Jarra	Conc. zeolita g/l	pH	Color Pt - Co	Turbidez [NTU]	DQO [mg/l]
	0	3,39	375	84	876
1	20	3,57	276	92	874
2	40	3,72	281	97	891
3	60	3,86	286	84	886
4	80	3,98	314	85	834
5	100	4,08	276	88	895
6	120	4,21	332	94	834

Experimento 11

Fecha de realización: 18 de junio 1998

Condiciones iniciales de la muestra

pH	<u>9,17</u>
turbidez =	<u>60</u> NTU
Color	<u>368</u> ADMI
DQO =	<u>961</u> mg/l

Uso de zeolita modifocada con cloruro de cetilpiridinio

No. Jarra	Conc. zeolita g/l	pH	Color Pt- Co	Turbidez [NTU]	DQO [mg/l]
	0	9,17	368	60	961
1	20	8,95	499	61	946
2	40	8,95	377	64	896
3	60	8,97	312	65	945
4	80	8,93	331	68	894
5	100	8,72	326	71	837
6	120	8,67	288	71	800

Experimento 12

Fecha de realización: 18 de junio 1998

Condiciones iniciales de la muestra

Variación de pH en una muestra obtenida de la planta

pH	Color [ADMI]	Turbidez [NTU]	DQO [mg/l]
2,35	126	32,1	207
5,4	164	76	246
6,53	145	53	208
7,11	137	47	251
8,09	140	45,5	213
10,1	124	44,2	218
11,55	88	106	257
11,7	78	61,4	197

Datos de la muestra original

Experimento 13

Fecha de realización: 8 de enero 1999

Condiciones iniciales de la muestra

Variación de pH en una muestra elaborada en forma artificial

pH	Pt - Co
1,91	266,91
2,32	284,84
3,775	266,91
5,354	255,70
6,004	287,09
8,322	298,30
10,176	273,63

Experimento 14

Fecha de realización: 23 de enero de 1999

Condiciones iniciales de la muestra

pH	<u>6,9</u>
turbidez =	<u>55</u> NTU
Color	<u>201,13</u> ADMI
DQO =	<u>58,29</u> mg/l

Uso de zeolita natural con una muestra artificial

No. Jarra	Conc. zeolita g/l	pH	DQO mg/l	Color Pt-Co	Turbidez UNT
	0	6,91	58,29	204,13	55
1	20	4,60	120,00	257,94	96
2	40	7,48	41,14	305,02	212
3	60	7,05	61,71	374,53	270
4	80	6,97	68,57	410,40	279
5	100	6,86	58,29	432,83	301
6	120	6,81	34,29	450,76	240

Experimento 15

Fecha de realización: 23 de enero de 1999

Condiciones iniciales de la muestra

pH	<u>5,18</u>
turbidez =	<u>62</u> NTU
Color	<u>237,76</u> Pt - Co
DQO =	<u>51,42</u> mg/l

Uso de zeolita modificada con cloruro de cteilpiridinio con una muestra artificial

No. Jarra	Conc. zeolita [g/l]	pH	DQO [mg/l]	Color [Pt-Co]	Turbidez [NTU]
	0	5,18	51,428571	237,76	62
1	20	6,396	171,42857	222,06	53
2	40	6,207	0	53,90	13
3	60	6,29	75,428571	53,90	11
4	80	6,376	51,428571	58,39	12
5	100	6,388	20,571429	74,08	11
6	120	6,485	27,428571	78,57	11

Experimento 16

Fecha de realización: 13 de febrero de 1999

Condiciones iniciales de la muestra

pH	<u>10</u>
turbidez =	<u>117</u> NTU
Color	<u>318,5</u> Pt - Co
DQO =	<u>95,3</u> mg/l

Uso de zeolita modificada con cloruro de cteilpiridinio con una muestra artificial

No. Jarra	Conc. zeolita [g/l]	pH	DQO [mg/l]	Color [Pt-Co]	Turbidez [UNT]
	0	10	95,34	318,48	117
1	20	7,28	98,63	293,81	94
2	40	7,31	49,32	42,69	39
3	60	7,29	52,60	29,24	10
4	80	7,23	101,92	18,03	4
5	100	7,23	39,45	20,27	2
6	120	7,2	62,47	20,27	3

Experimento 17

Fecha de realización: 13 de febrero de 1999

Condiciones iniciales de la muestra

Uso de zeolita modificada con cloruro de cetilpiridinio con una muestra artificial y ácido acético

Antes de la adición de la zeolita (condiciones iniciales de la muestra)

No. Jarra	Ac acét. %V	DQO mg/l	Color Pt-Co	Turbidez UNT	pH
1	0,04	497	352,11	120	3,16
2	0,08	828	374,53	120	3,04
3	0,12	894	396,95	117	3,02
4	0,16	2152	343,14	119	2,88
5	0,2	2152	356,59	117	2,81
6	0,24	2317	343,14	117	2,75

Después de la adición de la zeolita

No. Jarra	Conc. zeolita [g/l]	Ac acét. %V	DQO mg/l	Color Pt-Co	Turbidez UNT	pH
1	30	0,04	166	67,35426	37	3,69
2	30	0,08	166	44,932735	20	3,4
3	30	0,12	1092	62,869955	23	3,47
4	30	0,16	1225	92,017937	30	3,37
5	30	0,2	1490	56,143498	19	3,32
6	30	0,24	1490	76,32287	22	3,31

Experimento 18

Fecha de realización: 13 de febrero de 1999

Condiciones iniciales de la muestra

Uso de zeolita modificada con cloruro de cetilpiridinio con una muestra artificial y **detergente**

Antes de la adición de la zeolita (condiciones iniciales de la muestra)

No. Jarra	Detergente [g/l]	DQO [mg/l]	Color [Pt-Co]	Turbidez [UNT]	pH
1	0,2	151,2	331,9	123	7,5
2	0,4	243,3	457,5	142	8,2
3	0,6	289,3	737,8	173	8,6
4	0,8	407,7	816,2	199	8,8
5	1	197,3	937,3	210	8,9
6	1,2	854,8	861,1	245	8,9

Después de la adición de la zeolita

No. Jarra	Conc. zeolita [g/l]	Deterg. g/l	DQO mg/l	Color Pt-Co	Turbidez UNT	pH
1	30	0,2	85,479	293,81	82	6,82
2	30	0,4	72,329	264,66	81	7,2
3	30	0,6	42,740	354,35	90	7,44
4	30	0,8	92,055	320,72	85	7,76
5	30	1	85,479	331,93	83	7,82
6	30	1,2	92,055	361,08	86	8,01

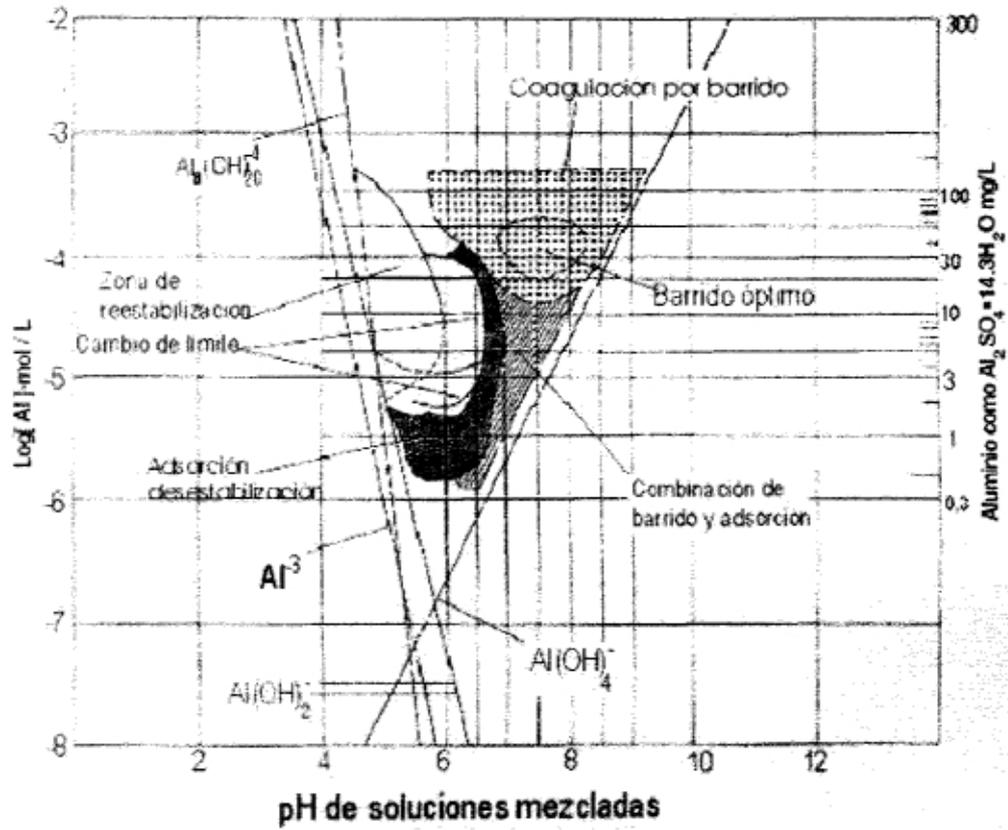


Diagrama de solubilidad del sulfato de aluminio